



UNIVERSITAS INDONESIA

**Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al dengan Metode
Pack Cementation Aluminizing Pada Permukaan Stainless Steel**

SKRIPSI

BAYU NUGROHO

0405040171

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2009

i



UNIVERSITAS INDONESIA

**Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al dengan Metode
Pack Cementation Aluminizing Pada Permukaan Stainless Steel**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

BAYU NUGROHO

0405040171

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2009

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Bayu Nugroho

NPM : 04050401717

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bayu Nugroho
NPM : 0405040171
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al
dengan Metode *Pack Cementation Aluminizing*
Pada Permukaan Stainless Steel

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Andi Rustandi, MT ()
Penguji : Ir. Yunita Sadeli, MSc. ()
Penguji : Ir. Yusuf Afandi, MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan limpahan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul “Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al dengan Metode *Pack Cementation Aluminizing* Pada Permukaan Stainless Steel” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

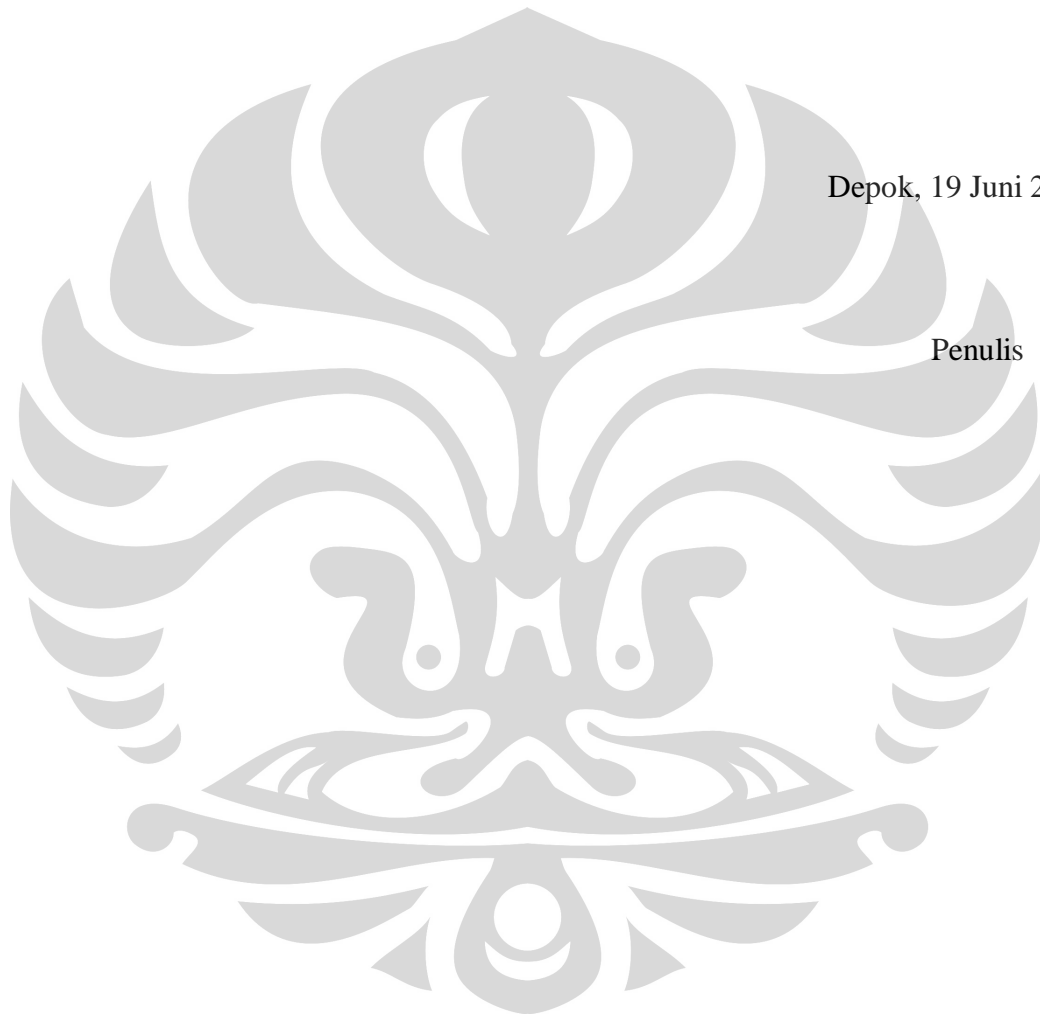
- (1) Bapak Ir. Andi Rustandi, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Bapak Edi Waluyo, yang telah memberikan sampel sudu turbin sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik;
- (3) Bapak Badrul Munir, PhD, yang telah memberikan bantuan sampel sehingga membantu keberlangsungan penelitian yang telah dilakukan;
- (4) Bapak Wahyono, yang telah banyak memberikan bantuan dalam pembelian keramik;
- (5) Bapak Furqon, yang telah banyak membantu dalam masalah transportasi;
- (6) Bapak Eko dan Zaenal, yang telah banyak membantu dalam masalah di laboratorium;
- (7) Bapak Yusuf Afandi, yang telah banyak membantu.
- (8) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun material; dan

(9) Teman-teman Metalurgi angkatan 2005 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Dan saya dedikasikan skripsi saya ini untuk bangsa Indonesia, semoga skripsi ini dapat berguna bagi masyarakat, khususnya bangsa Indonesia sehingga dapat meningkatkan kemajuan bagi bangsa & negara.

Depok, 19 Juni 2009

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Bayu Nugroho
NPM : 0405040171
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya saya yang berjudul :

Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al dengan Metode *Pack Cementation Aluminizing* Pada Permukaan Stainless Steel

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 7 Juli 2009

Yang menyatakan

(Bayu Nugroho)

ABSTRAK

Nama : Bayu Nugroho
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Awal Proses Pembentukan Lapisan Fe-Al dengan Metode *Pack Cementation Aluminizing* Pada Permukaan Stainless Steel.

Salah satu sasaran dari penelitian ini adalah meningkatkan ketebalan *coating* Fe-Al agar dapat memperbaiki ketahanan terhadap sulfidisasi dari material ini. Senyawa intermetalik Fe-Al seperti diketahui memiliki sifat tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi temperatur tinggi dari stainless steel 410, lapisan intermetalik Fe-Al dibuat pada permukaan substrate yang mengandung Fe yang tinggi dengan menggunakan metode *pack cementation aluminizing*. Parameter percobaan *pack cementation aluminizing* antara lain : waktu proses dan kandungan aluminium dalam material *pack* akan membentuk lapisan intermetalik Fe-Al dengan ketebalan dan komposisi yang sesuai.

Hasil penelitian menunjukkan, meningkatnya waktu proses akan meningkatkan ketebalan *coating* dari 3,95 μm menjadi 11,66 μm . Peningkatan kandungan aluminium dalam material *pack* juga akan meningkatkan ketebalan *coating* dari 9,68 menjadi 12,64. *Coating* terdiri dari larutan padat Fe-Al. Berdasarkan hasil tersebut, komposisi yang diteliti belum dapat membentuk lapisan intermetalik Fe-Al. Untuk membentuk lapisan intermetalik Fe-Al kandungan aluminium dalam material *pack* perlu ditingkatkan.

Kata kunci :

Pack cementation aluminizing, stainless steel 410, lapisan coating Fe-Al.

ABSTRACT

Name : Bayu Nugroho
Study Program : Metallurgical and Material Engineering
Title : *Study Fe-Al Coating Formation with Pack Cementation
Aluminizing Method on Stainless Steel Surface*

One of the specific goals of the present research is to increase the thickness of the outer aluminide layer of Fe-Al coatings to improve sulfidation resistance of these alloys. Iron aluminide (Fe-Al) intermetallic compounds are well known for their high temperature oxidation resistance. In an effort to increase high temperature oxidation resistance of stainless steel 410, iron-aluminum (Fe-Al) intermetallic coatings with high iron content were grown on the substrate by the pack cementation aluminizing method. Pack cementation aluminizing parameters such as time and aluminum content were varied to fabricate an iron aluminide (Fe-Al) with suitable thickness and composition.

The result revealed that the increase of time process will raise the coating thickness, 3.95 μm to 11.66 μm . The Increase of aluminum content in material pack will increase the coating thickness from 9.68 μm to 12.64 μm . The coating consisted of a Fe-Al solid solution. Based on the result, the researched composition cannot form Fe-Al intermetallic layer. To form the Fe-Al intermetallic layer, the content of aluminum in material pack needs to be increase.

Keywords :

Pack cementation aluminizing, stainless steel 410, iron-aluminide (Fe-Al).

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vii
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	5
1.3 Batasan Penelitian	5
1.4 Sistematika Penulisan	6
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 Lingkungan Temperatur Tinggi	7
2.2 Konsep Termodinamika	11
2.2.1 Entalpi	11
2.2.2 Entropi	11
2.2.3 Energi Bebas	11
2.2.4 Tetapan Kesetimbangan	12
2.3 Konsep Kinetika	12
2.3.1 Energi Aktifasi	13
2.3.2 Difusi	14
2.4 Struktur Kristal	15
2.5 Oksidasi	18
2.6 Oksidasi Pada Paduan	23
2.7 Fungsi Khusus Unsur-Unsur Paduan lain	25

2.8 Prinsip Perlindungan Terhadap Korosi Temperatur Tinggi.....	27
2.9 <i>Coating</i> Untuk Oksidasi dan Korosi Temperatur Tinggi.....	28
2.9.1 <i>Coating</i> Logam.....	28
2.9.2 Proses <i>Coating</i>	31
2.9.3 <i>Diffusion Coating</i>	31
2.9.3.1 <i>Pack Coatings</i>	32
2.9.3.2 <i>Pack Cementation Process</i>	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	45
3.1 Diagram Penelitian	45
3.2 Preparasi Sampel.....	46
3.2.1 Pemotongan (<i>cutting</i>).....	46
3.2.2 Uji Kekerasan.....	47
3.2.3 Pengamatan Mikrostruktur.....	48
3.2.4 Uji Komposisi Kimia.....	49
3.3 Pembuatan <i>Coating</i>	49
3.4 Proses <i>Coating</i>	50
3.5 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro dan SEM.....	51
3.5.1 Pemotongan.....	51
3.5.2 <i>Mounting</i>	52
3.5.3 Pengamplasan.....	52
3.5.4 Pemolesan	53
3.5.5 Etsa	53
3.6 Pengujian Sampel.....	54
3.6.1 Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM dan EDX.....	54
3.6.2 Pengamatan dengan <i>X-Ray Diffraction</i>	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1 Pengujian Komposisi Kimia	56
4.2 Pengamatan Struktur Mikro.....	58
4.3 Pengamatan Visual.....	59
4.4 Hasil Pengujian dengan <i>X-Ray Diffraction</i>	60
4.5 Pengaruh Waktu Tahan Pemanasan Terhadap Proses <i>Pack Aluminizing</i>	62

4.6 Pengaruh Kandungan Alumunium Dalam <i>Material Pack</i> Terhadap Proses <i>Pack Aluminizing</i>	67
BAB V KESIMPULAN.....	71
DAFTAR REFERENSI	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Temperatur Tinggi dengan Temperatur Komponen dan Usia Penggunaanya.....	9
Gambar 2.2 Temperatur Yang Digunakan Pada Berbagai Jenis Industri.....	10
Gambar 2.3 Temperatur Kerja dari Berbagai Material	10
Gambar 2.4 Konsep dari Energi Aktifasi	13
Gambar 2.5 Difusi Terhadap Tingkat Konsentrasi	15
Gambar 2.6 Susunan Atom.....	16
Gambar 2.7 Tujuh Sistem Kristal dan Kisi Kristalnya.....	17
Gambar 2.8 Skematik dari <i>edge</i> (E) dan <i>screw dislocations</i> (S)	18
Gambar 2.9 Diagram <i>Ellingham</i>	20
Gambar 2.10 <i>Binary alloy oxidation</i>	24
Gambar 2.11 Macam-Macam Proses <i>Coating</i>	30
Gambar 2.12 Macam-Macam Proses Difusi <i>Coating</i>	32
Gambar 2.13 Skema Alat yang Digunakan Untuk <i>pack aluminizing</i>	35
Gambar 2.14 Prosedur Untuk <i>Pack Aluminizing</i>	36
Gambar 2.15 Reaksi yang Terjadi dengan <i>Pack Activator</i>	36
Gambar 2.16 Skema Reaksi yang Terjadi Pada <i>Pack Cementation Process</i>	36
Gambar 2.17 Skema Pembentukan Lapisan <i>Coating</i> Melalui Proses <i>Pack Cementation Aluminizing</i>	38
Gambar 2.18 Perhitungan aktifitas aluminium chloride yang dibentuk oleh 10 % Al, 1% NH ₄ Cl dan 89% Al ₂ O ₃	41
Gambar 2.19 Pembentukan Difusi Aluminide Pada Ni	42
Gambar 2.20 Pembentukan Struktur Mikro Pada <i>High Activity Process</i>	43
Gambar 2.21 Struktur mikro <i>Ni-Base Superalloy</i>	44
Gambar 2.22 Diagram Fasa Fe-Al	44
Gambar 3.1 Sudu Turbin Dari Material SS 410	46
Gambar 3.2 Hasil Pemotongan Sampel.....	47
Gambar 3.3 Skema penjejukan.....	48
Gambar 3.4 Alat Microhardness	48
Gambar 3.5 Wadah Yang Digunakan Untuk Membuat <i>Pack Aluminide</i>	49

Gambar 3.6 Wadah Yang Sudah Siap Untuk Dimasukan Kedalam Oven.....	51
Gambar 3.7 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	54
Gambar 4.1 Struktur <i>Mikro Martensitik Stainless Steel</i>	58
Gambar 4.2 Tampilan Fisik Hasil <i>Coating</i> dengan Komposisi 6% Al-2% NH ₄ Cl-92% Al ₂ O ₃ dengan Waktu Proses 3 jam.....	59
Gambar 4.3 Tampilan Fisik Hasil <i>Coating</i> dengan Komposisi 6% Al-2% NH ₄ Cl-92% Al ₂ O ₃ dengan Waktu Proses 6 Jam	59
Gambar 4.4 Tampilan Fisik Hasil <i>Coating</i> dengan Komposisi 6% Al-2% NH ₄ Cl-92% Al ₂ O ₃ dengan Waktu Proses 24 Jam	59
Gambar 4.5 Diagram <i>XRD</i>	60
Gambar 4.6 Pola Diagram <i>XRD</i> Literatur Terbentuknya Lapisan β-FeAl	61
Gambar 4.7 Pola Diagram <i>XRD</i> Literatur Terbentuknya Lapisan Fe ₂ Al ₅ dan Cr ₃ Si.....	61
Gambar 4.8 Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i>	62
Gambar 4.9 Perbedaan Ketebalan <i>Coating</i> Berdasarkan Waktu Proses	63
Gambar 4.10 Ukuran Ketebalan <i>Coating</i>	64
Gambar 4.11 Hasil Pengujian EDX dan Foto SEM Waktu Proses 3 Jam.....	64
Gambar 4.12 Hasil Pengujian EDX dan Foto SEM Waktu Proses 6 Jam.....	65
Gambar 4.13 Skema Pembentukan Lapisan Intermetalik	66
Gambar 4.14 Perbedaan Ketebalan <i>Coating</i> Berdasarkan Kandungan Al Dalam Material Pack	68
Gambar 4.15 Ukuran Ketebalan <i>Coating</i>	68
Gambar 4.16 Hasil Pengujian EDX dan Foto SEM, Komposisi : 6% Al- 2% NH ₄ Cl- 92% Al ₂ O ₃	69
Gambar 4.17 Hasil Pengujian EDX dan Foto SEM, Komposisi : 8% Al- 2% NH ₄ Cl- 90% Al ₂ O ₃	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 PBR dari Beberapa Oksida Logam.....	23
Tabel 2.2 Unsur-Unsur Pada <i>Coating</i> , Fungsi dan Pengaruhnya	29
Tabel 3.1 Komposisi <i>Material Pack</i>	50
Tabel 4.1 Komposisi Kimia <i>Stainless Steel 410</i>	56



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia baik untuk kegiatan industri, kegiatan komersial maupun dalam kehidupan sehari-hari rumah tangga. Energi listrik dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan penerangan dan juga proses produksi yang melibatkan barang-barang elektronik dan alat-alat/mesin industri. Mengingat begitu besar dan pentingnya manfaat energi listrik sedangkan sumber energi pembangkit listrik terutama yang berasal dari sumber daya tak terbarui keberadaannya terbatas, maka untuk menjaga kelestarian sumber energi ini perlu diupayakan langkah-langkah strategis yang dapat menunjang penyediaan energi listrik secara optimal.

Perkembangan industri di Indonesia dewasa ini cukup pesat. Sehubungan dengan hal itu perguruan tinggi sebagai tempat untuk menghasilkan sumber daya manusia yang berkualitas, berkepribadian mandiri, dan memiliki kemampuan intelektual yang baik merasa terpanggil untuk semakin meningkatkan mutu *outputnya*. Ditinjau dari kondisi bangsa sebagai aktualisasi kehidupan manusia secara komunal, maka pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi mempunyai peran penting, khususnya dalam hal konversi energi kinetik menjadi energi listrik.

Indonesia saat ini membutuhkan konsumsi energi listrik dalam jumlah besar hingga melebihi persediaan energi listrik nasional, dan pemakaian energi listrik setiap tahunnya semakin meningkat. Sampai saat ini krisis energi listrik belum bisa dihindari, hal ini ditegaskan dengan adanya pemadaman bergilir yang berakibat merugikan masyarakat dan industri yang pada akhirnya berpengaruh terhadap tingkat kemajuan ekonomi.

Selain kerugian langsung yang diderita masyarakat dan industri akibat krisis energi listrik, pemerintah juga dirugikan dengan sulitnya investor menanamkan modalnya karena masalah krisis energi listrik akan membawa kerugian besar bagi proses produksi. Selama ini kendala ketersediaan energi listrik, yaitu akibat penggunaan bahan bakar minyak masih menjadi bahan bakar

utama bagi unit pembangkit listrik. Walaupun pemerintah mulai mengembangkan pemanfaatan energi selain bahan bakar minyak untuk unit pembangkit listrik, tapi belum optimal. Keterbatasan unit pembangkit listrik baik yang bergantung pada bahan bakar minyak maupun pada gas alam atau panas bumi masih menjadi masalah yang tak kunjung selesai.

Faktor berikutnya yang menjadi penyebab ketersediaan energi listrik terganggu adalah kerusakan pada alat atau mesin dari unit pembangkit listrik yang bersangkutan. Kerusakan alat atau mesin dari unit pembangkit listrik akan menyebabkan produksi energi listrik terhenti. Jika produksi energi listrik dari suatu unit pembangkit listrik terhenti, maka pasokan listrik ke masyarakat atau industri pun terhenti. Oleh karena itu, perawatan alat-alat dan mesin pembangkit listrik atau pemilihan material dari mesin/alat-alat pembangkit listrik tersebut seperti, dapur pembakaran, turbin gas, turbin uap, generator, dan alat-alat lainnya yang bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi harus melewati seleksi material yang tepat.

Untuk mengatasi krisis energi listrik ini pemerintah menyatakan akan mengembangkan sumber energi gas alam yang belum optimal dimanfaatkan. Saat ini cadangan gas alam yang dimiliki Indonesia diperkirakan tersedia sebesar 134,0 triliun kaki kubik (TCF) yang tersebar di Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Tengah, Sumatera Selatan, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Kalimantan Timur, Natuna, Sulawesi Selatan, dan Papua, namun produksi gas alam Indonesia baru 3 juta TCF per tahun^[1].

Pemanfaatan gas alam yang optimal akan menjadi solusi dalam permasalahan krisis energi listrik nasional. Gas alam dewasa ini telah menjadi sumber energi alternatif yang banyak digunakan oleh masyarakat dunia untuk berbagai keperluan, baik untuk perumahan, komersial maupun industri. Dari tahun ke tahun penggunaan gas alam selalu meningkat. Hal ini karena banyaknya keuntungan yang didapat dari penggunaan gas alam dibanding dengan sumber energi lain. Energi yang dihasilkan gas alam lebih efisien. Tidak seperti halnya dengan minyak bumi dan batu bara, penggunaannya jauh lebih bersih dan sangat ramah lingkungan sehingga tidak menimbulkan polusi terhadap lingkungan.

Sejauh ini pemerintah Indonesia belum optimal memanfaatkan gas alam, pemanfaatan gas alam yang sudah dilakukan salah satunya dengan menjadikan bahan bakar pada suatu unit pembangkit listrik, yang dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). Konversi energi kinetik menjadi energi listrik dengan bahan bakar gas alam memiliki efisiensi yang tinggi dan ketersediaan bahan bakar gas alam masih besar. Peningkatan efisiensi pada pembangkit listrik bisa dilakukan, salah satunya melalui penerapan siklus kombinasi (*combined cycle*) antara PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dan PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas). Pemanfaatan gas buang dari PLTG yang masih memiliki temperatur tinggi untuk menguapkan air di siklus PLTU akan menghasilkan efisiensi siklus gabungan yang sangat tinggi. Pilihan lain untuk memaksimalkan energi PLTG adalah melalui kombinasi dengan siklus refrigerasi absorpsi. Teknik semacam ini telah diterapkan di Shinjuku Jepang; dari satu sumber energi (gas alam) dihasilkanlah listrik, air panas, dan air dingin untuk refrigerasi (pendingin dan pengkondisian udara).

Hingga saat ini, Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) telah memberikan kontribusi yang *significant* dalam hal pasokan energi listrik nasional, pembangkit listrik tersebut antara lain^[2]:

- PLTG UP-Gresik, kapasitas : 80,4 MW
- PLTGU UP-Gresik, kapasitas : 1.578,78MW
- PLTGU UP-Muara Karang, kapasitas : 508,58 MW
- PLTG UP-Muara Tawar, kapasitas : 280 MW
- PLTGU UP-Muara Tawar, kapasitas : 640 MW

Pada PLTG dan PLTGU di mana kondisi operasinya dalam tekanan dan temperatur tinggi, pemilihan material yang digunakan untuk peralatan dan sistem harus memiliki sifat yang memiliki ketahanan terhadap korosi temperatur tinggi. Oleh karena itu, pemilihan material dan proses *surface treatment* yang tepat guna dilakukan agar proses operasi berjalan dengan baik.

Komponen utama PLTG atau PLTGU terdiri atas beberapa peralatan yang satu dengan yang lainnya terintegrasi sehingga menjadi satu unit lengkap yang dapat dioperasikan sebagaimana mestinya.

Komponen-komponen PLTG atau PLTGU diantaranya adalah^[3] :

- Kompresor Utama
- *Combustion Chamber*
- Turbin Gas
- *Load Gear*
- *Generator* dan *Exciter*
- Alat Bantu
- Kontrol, Instrumentasi, dan Pengaman
- Peralatan listrik
- dll

Turbin gas suatu PLTG atau PLTGU berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Turbin gas berfungsi untuk membangkitkan energi mekanis dari sumber energi panas yang dihasilkan pada proses pembakaran. Selanjutnya energi mekanis ini akan digunakan untuk memutar generator listrik baik melalui perantara *Load Gear* atau tidak, sehingga diperoleh energi listrik. Dikarenakan begitu pentingnya fungsi suatu turbin gas maka pemilihan material untuk turbin gas haruslah selektif yang memiliki sifat mekanik tahan tekanan dan temperatur tinggi.

Material yang memiliki sifat mekanik tahan tekanan dan temperatur tinggi diantaranya *stainless steel*, *stainless steel* pada umumnya digunakan sebagai material dasar sudu turbin gas. *Stainless steel* memiliki sifat mekanik yang baik untuk kondisi kerja tekanan dan temperatur tinggi, material ini memiliki ketahanan korosi hingga suhu sekitar 500⁰ C.

Proses *surface treatment* pada alat-alat atau mesin unit pembangkit listrik akan memberikan dampak positif, dimana secara langsung dapat menambah umur pakai dari alat yang pada akhirnya mengurangi frekuensi terhentinya proses produksi listrik. Proses *surface treatment* pada alat atau mesin berpengaruh terhadap lancarnya proses produksi listrik dari suatu unit pembangkit listrik. Namun pada kenyataannya, tidak semua alat dari komponen mesin unit pembangkit listrik diberikan *surface treatment*, contohnya sudu-sudu turbin dari

material *stainless steel*, selama ini sudu turbin (*turbin blade*) tidak dilakukan *surface treatment* karena dianggap memiliki ketahanan korosi yang sangat baik. Pada aplikasinya ternyata *stainless steel* yang dipakai untuk sudu turbin masih mengalami korosi.

Hal ini membuka kesempatan berkembangnya suatu pemahaman baru terhadap perlakuan *stainless steel* dalam aplikasinya. Karena selama ini, *stainless steel* yang dipakai pada penelitian ini sebelumnya tidak pernah mengalami *surface treatment*. Pada fasa *martensitic stainless steel* digunakan untuk bahan material dasar turbin gas.

Tingkat ketahanan korosi suatu sudu turbin gas bergantung pada jenis material dan proses *surface treatment* yang dilakukan, namun pada sudu turbin gas hingga saat ini tidak dilakukan proses pelapisan (*coating*). Oleh karena itu, Penulis bersama dengan pembimbing penelitian tertarik untuk meneliti lebih lanjut mengenai laju korosi pada sudu turbin gas dan bagaimana meningkatkan ketahanan korosi dengan cara pelapisan Pack Aluminide pada lingkungan fluida bertekanan dan temperatur tinggi. Material pack yang digunakan untuk membuat *coating* ini adalah logam yang akan diendapkan (*master alloy*), misalnya seperti serbuk alumunium atau serbuk paduan Al-Cr; serbuk *activator* yaitu garam-garam halida seperti NH_4Cl , NH_4F , NaCl , NaF , yang akan bereaksi dengan serbuk logam membentuk halida logam; serbuk alumina (Al_2O_3) yang inert atau tidak turut bereaksi.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Mengetahui pengaruh waktu proses terhadap karakteristik *coating* yang terbentuk.
2. Mengetahui pengaruh kandungan alumunium dari material *pack* terhadap karakteristik *coating* yang terbentuk.

1.3. Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara :

1. Material yang menjadi objek utama dalam penelitian ini adalah *Stainless Steel* 410 yang berasal dari sudu turbin.
2. Menggunakan gas *inert* pada proses pembuatan *coating*.
3. Material *pack* yang digunakan semuanya dalam bentuk serbuk.
4. Variabel kadar *activator* yang digunakan sebesar 2% dan 4%
5. Variabel waktu proses yang digunakan adalah 3 jam dan 6 jam.
6. Variabel temperatur yang digunakan adalah 850°C dan 1000°C
7. Variabel kadar aluminium dari material *pack* sebesar 4% dan 8%.
8. Variabel lain selama proses *pack aluminide* dibuat tetap seperti tekanan gas *inert* .
9. Pengujian yang dilakukan yaitu uji komposisi kimia, foto mikrostruktur, pengamatan SEM, EDX dan XRD.

1.4. Sistematika Penulisan

Bab 1 Berisi latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Menjelaskan dasar teori mengenai korosi temperatur tinggi, profil pelapisan *Pack Aluminide Coating* dan mekanisme pembentukan lapisan Fe-Al

Bab 3 Menjelaskan tentang prosedur penelitian yang mencakup proses preparasi sampel dari material yang diujikan hingga didapatkan kesimpulan dari penelitian.

Bab 4 Berisi tentang data pengujian dan analisa berdasarkan hasil pengujian.

Bab 5 Berisi mengenai kesimpulan dari penelitian.

Referensi dan lampiran dimuat pada halaman-halaman terakhir dalam laporan penelitian ini.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 LINGKUNGAN TEMPERATUR TINGGI

Dalam perkembangan teknologi yang semakin canggih ini pada semua bidang termasuk dalam bidang industri, maka kemajuan teknologi ini akan mempengaruhi suatu proses dalam suatu industri. Pada industri yang sekarang ini berkembangpun kondisi operasinya dapat bermacam-macam bahkan dalam lingkungan yang sifatnya sangat agresif seperti lingkungan temperatur tinggi, peningkatan temperatur yang sangat signifikan, tekanan tinggi, tekanan yang terpusat pada suatu komponen dan kemungkinan adanya oksidasi dan korosi atmosferik, yang dapat terjadi didalam atau diluar dari suatu material, yang dapat menyebabkan terjadinya erosi dan kegagalan dari suatu komponen. Gambaran dari kondisi ini dapat dilihat pada gambar 2.1. Mesin-mesin yang digunakan pada kondisi temperatur tinggi seperti: mesin turbin gas pada pesawat terbang, *steam turbines*, industri turbin gas, mesin konversi batubara, mesin pemurnian minyak bumi dan reaktor nuklir. Sekarang ini adalah zaman dimana penggunaan komponen yang mampu tahan terhadap panas dan temperatur tinggi dilakukan secara besaran-besaran untuk mendukung suatu proses. Sebagai contoh, dalam mesin jet, bahan bakar akan dicampur dengan udara yang bertekanan tinggi kemudian dibakar. Sebagai hasilnya akan dihasilkan suatu panas, akibatnya udara akan mengembang dan akan menggerakkan turbin. Turbin akan menjadi gaya dorong untuk kompresor supaya berputar, kemudian gas yang keluar akan digunakan sebagai gaya dorong. Temperatur gas pada mesin turbin gas dapat bekerja melampaui 1650°C pada daerah turbinnya, dan bagian terdingin dari mesin itu dapat mencapai temperatur sekitar 1200°C. Pada industri batubara, batubara akan bereaksi dengan *steam* pada temperatur tinggi, untuk mengubah batubara tersebut menjadi gas yang dapat digunakan, yang kemudian akan dialirkan ke pipa dan tempat penampungan secara langsung dalam suatu proses di pabrik. Temperatur proses berlangsung pada temperature tinggi sekitar 1650°C dengan rata-rata

temperatur komponen sekitar 1090°C. Temperatur proses yang tinggi juga dialami pada proses pemurnian minyak bumi dan pembangkit listrik tenaga nuklir [4].

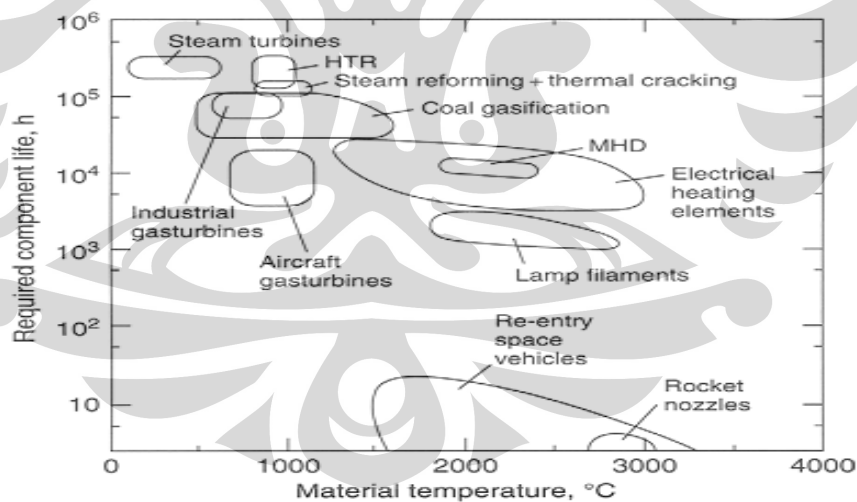
Semua proses ini memerlukan material yang mampu bekerja pada temperatur tinggi. Selama proses tersebut, struktur dari material dapat mengalami suatu penurunan kualitas, seperti : fatik dan *creep* yang disebabkan karena adanya beban yang bekerja pada material tersebut, material ini juga dapat mengalami oksidasi, korosi dan erosi. Temperatur dari berbagai macam proses industri dan titik leleh dari beberapa material struktur dapat dilihat pada gambar 2.2.

Jangkauan kekuatan dari beberapa material yang biasa digunakan pada proses temperatur tinggi sebagai fungsi temperatur dapat dilihat pada gambar 2.3. Sifat-sifat dari material, seperti : *tensile*, *creep* dan fatik harus optimum ketika diberikan beban maksimum dari suatu proses, selain itu juga harus tahan terhadap lingkungan. Sebagai contoh, sudu turbin pada mesin pesawat akan diperkuat dengan adanya endapan yang dihasilkan dari endapan fasa gamma primer dalam *matrix* fasa gamma. Oleh karena adanya endapan-endapan tersebut maka material tersebut akan tahan terhadap peristiwa *creep*. Jika suatu *alloy* dibiarkan tanpa suatu perlindungan pada lingkungan yang memiliki tekanan dan temperatur yang tinggi seperti pada mesin turbin gas modern, maka material ini akan cepat mengalami beberapa proses dibawah ini^[4].

- A. Oksidasi : Suatu paduan tidak akan cukup jika hanya dengan menambahkan unsur Al dan Cr untuk menahan terjadinya oksidasi pada suatu bagian tertentu. Peningkatan Al, dapat meningkatkan tingkat kelarutan sehingga ketahanan oksidasi dapat meningkat. Tetapi dengan tingginya kandungan Al akan menurunkan titik leburnya, menurunkan kemampuan untuk menahan beban dan ketahanan terhadap peristiwa *creep*, sedangkan sifat-sifat tersebut sangat dibutuhkan untuk mendesain suatu sudu turbin dan perangkat-perangkat yang ada pada sudu turbin.
- B. Korosi Temperatur Tinggi : Kandungan Cr biasa ditambahkan pada suatu paduan yang digunakan untuk membuat sudu turbin, bertujuan untuk

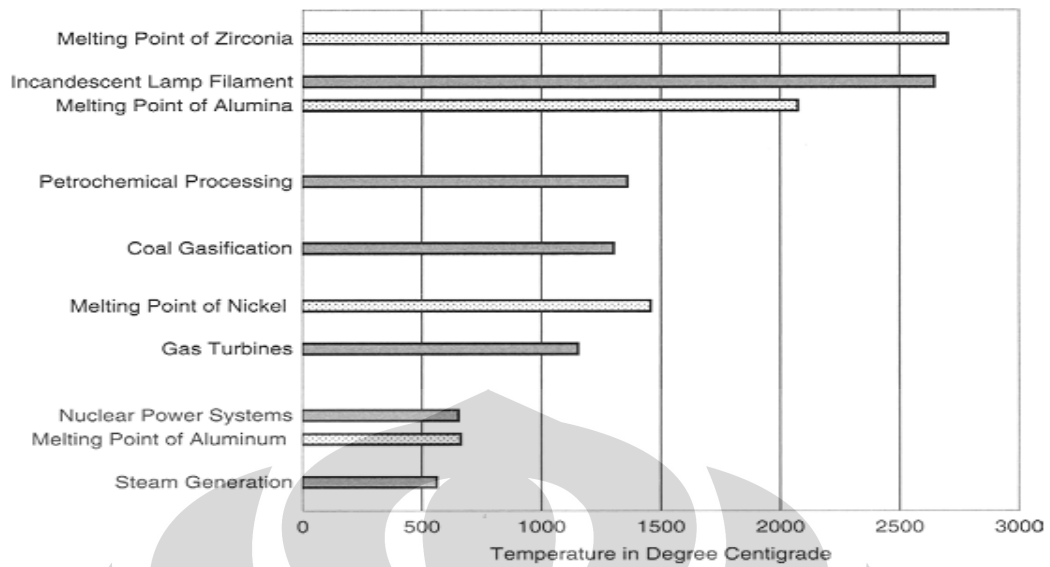
meningkatkan ketahanan korosi. Kandungan Cr pada paduan tidak boleh terlalu banyak karena dapat mengurangi ketangguhan.

C. Kerusakan diakibatkan panas : akibat jika suatu material dikerjakan pada temperatur tinggi maka akan mengalami oksidasi dan korosi. Selain itu juga material dapat mengalami kerusakan karena adanya suatu siklus pada temperatur tinggi dimana didalamnya terdapat tegangan yang berfluktuasi sehingga dapat menyebabkan terjadinya *thermal fatigue*. Penguatannya dapat dibantu dengan adanya paduan untuk meningkatkan ketahanan terhadap cacat fatik. Kebanyakan perlindungan yang digunakan untuk mengatasi kerusakan ini adalah dengan melakukan perlakuan pada permukaan dari material tersebut. Untuk masalah oksidasi dan korosi, perlakuan permukaan yang sesuai adalah dengan melakukan *coating*. *Coating* akan menghalangi permukaan material dengan lingkungan kerja. *Coating* yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan dan lingkungan kerjanya, untuk contoh, peningkatan kandungan Al dan Cr, baik untuk menahan oksidasi tetapi ketangguhannya berkurang. Oleh karena itu semua harus disesuaikan dengan aplikasinya.



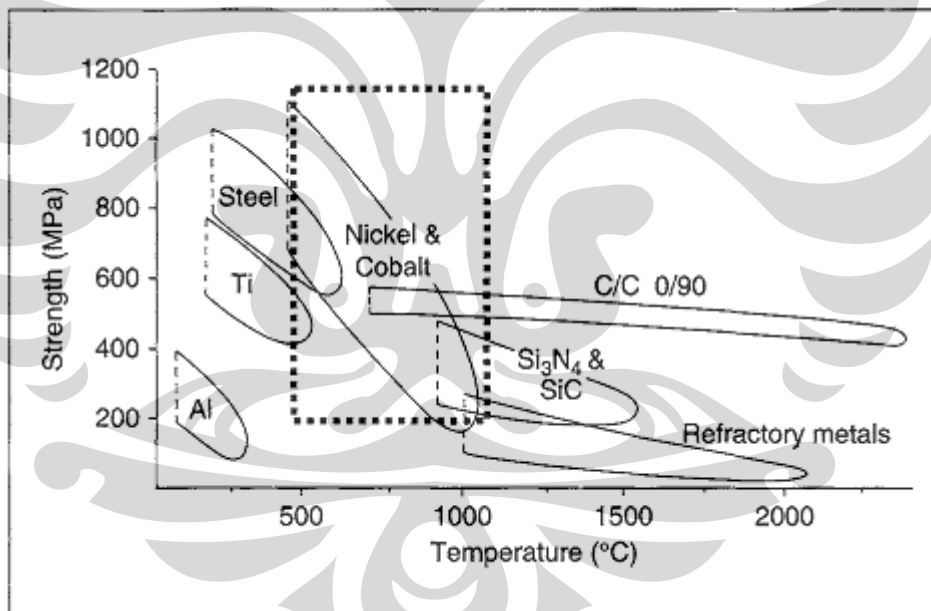
Gambar 2.1 Proses temperatur tinggi dengan temperatur komponen dan usia penggunaannya.

Sumber : M.F. Stroosnijer, R. Mevrel dan M. J. Bennet^[5] telah diolah kembali



Gambar 2.2 Temperatur yang digunakan pada berbagai jenis industry

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose^[4] telah diolah kembali



Gambar 2.3 Temperatur kerja dari berbagai material.

Sumber : G. W. Meetham, Materials and design (1988)^[6] telah diolah kembali

2.2 KONSEP TERMODINAMIKA

Prinsip dari termodinamika adalah untuk mengetahui apakah suatu reaksi dapat berlangsung secara spontan atau tidak dan mengetahui fenomena yang terjadi. Contoh aplikasi termodinamika adalah pada proses ekstraksi logam dari bijihnya, pembuatan paduan, endapan dan pertumbuhan butir dan penurunan kualitas dari suatu material pada saat penggunaan^[4].

2.2.1 Entalpi

Entalpi adalah gabungan dari internal energi (E), tekanan (P) dan volume (V) dari suatu sistem. Maka $H = E + PV$. Sebagai contoh, jika suatu sistem dapat diibaratkan balon udara yang terbuat dari karet, maka tekanannya adalah atmosfer. Jika pada sistem ini ditambahkan sejumlah panas (dQ), maka akan meningkatkan internal energy (dE) dan akan mempengaruhi perubahan volume (dV) sedangkan tekanan tetap (P). Maka, $dQ = dE + PdV$, untuk tekanan yang tetap menjadi $dQ = d(E + PV)$. Jadi perubahan entalpi sangat berhubungan dengan kapasitas panas yang diberikan pada sistem dengan kondisi tekanan yang tetap^[7].

2.2.2 Entropi

Entropi adalah ukuran ketidakteraturan sistem atau secara sederhana dapat dikatakan sebagai derajat ketidakteraturan atau derajat kehancuran. Hukum kedua termodinamika menyatakan secara teori bahwa semua proses di alam cenderung terjadi hanya dengan peningkatan entropi dan arah perubahan selalu menuju ke entropi yang lebih tinggi^[4].

2.2.3 Energi Bebas

Energi bebas adalah gabungan semua konsep termodinamika termasuk entalpi (H) dan entropi (S). Oleh karena itu dapat dirumuskan $G = H - TS$. Jika ada perubahan kecil pada suatu sistem pada temperatur yang tetap, maka akan dihasilkan perubahan energi bebas yang dapat dituliskan dengan $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$.

Perubahan energi bebas akan menentukan suatu reaksi dapat terjadi atau tidak. Jika ΔG bernilai negatif maka reaksi akan berlangsung secara sendiri

(*spontan*) contoh : $\frac{4}{3} \text{Al} + \text{O}_2 = \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3$, reaksi ini akan berjalan ke sebelah kanan secara sendiri tanpa bantuan dari luar dan akan menghasilkan oksida ketika bersentuhan langsung dengan oksigen. Sebaliknya jika ΔG bernilai positif maka reaksi tidak dapat berlangsung tanpa adanya energi dari luar. Termodinamika hanya untuk menentukan reaksi yang terjadi, tidak dapat untuk menentukan kecepatan oksidasi^[4].

2.2.4 Tetapan Kesetimbangan

Konsep dari tetapan keseimbangan pada termodinamika sama seperti pada ilmu kimia dan digunakan untuk menghitung perubahan energi bebas. Untuk reaksi $\frac{4}{3} \text{Al} + \text{O}_2 = \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3$, tetapan keseimbangannya adalah $K = \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3]^{2/3}}{[\text{Al}]^{4/3}[\text{O}_2]}$, dimana [] menandakan konsentrasi. Hubungan antara reaksi perubahan energi bebas pada keadaan setimbang dengan tetapan kesetimbangan dapat dituliskan $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K$, dimana R adalah konstanta gas, ΔG adalah perubahan energi bebas dalam keadaan yang tidak ditentukan dan ΔG° adalah perubahan energi bebas yang meliputi pereaksi dan produknya dalam kondisi standar. Ketika reaksi setimbang, $\Delta G = 0$. Maka persamaannya menjadi $\Delta G^\circ = -RT \ln K$ ^[4].

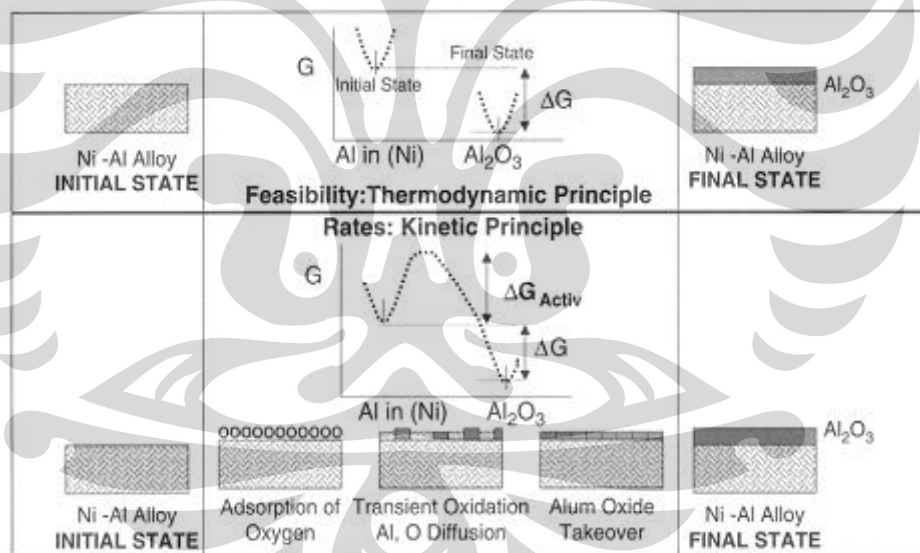
2.3 KONSEP KINETIKA

Termodinamika digunakan untuk menganalisa suatu proses seperti oksidasi, pelarutan, endapan atau pertumbuhan butir apakah bisa terjadi atau tidak dengan cara memperkirakan perubahan energi bebasnya. Oleh karena itu untuk memprediksi kecepatan yang terjadi selama proses berlangsung tidak dapat menggunakan termodinamika, Secara prinsipnya kinetika menentukan apakah suatu proses dapat layak terjadi. Contoh yang mudah dari keterbatasan termodinamika adalah hubungan antara berlian dan grafit, menurut konsep termodinamika reaksi C (berlian) dapat berubah menjadi C (grafit) pada temperatur dan tekanan yang normal dan akan menghasilkan perubahan energi bebas yang negatif. Maka berlian dapat berubah secara sendiri menjadi grafit.

Bagaimanapun kita mengetahui bahwa hal ini tidak akan terjadi. Alasannya karena meliputi kinetiknya atau kecepatan reaksinya. Pada berlian terdapat empat atom yang menempel pada sudut-sudut struktur kristal tetrahedral, sedangkan dalam grafit hanya terdapat tiga atom dengan ikatan yang lemah. Oleh karena itu, untuk dibutuhkan energi dari luar untuk melakukan proses ini, prediksi secara termodinamika pada proses ini tidak akan bisa terjadi tanpa adanya energi dari luar^[4].

2.3.1 Energi Aktifasi

Berdasarkan contoh yang telah diberikan sebelumnya dapat diketahui fungsi dari energi dalam suatu proses. Energi ini disebut energi aktivasi, konsep dari energi aktivasi dapat digambarkan pada oksidasi paduan Ni-Al dalam gambar 2.4, membandingkan prinsip termodinamika yang memprediksikan kemungkinan yang dapat terjadi dengan prinsip kinetika yang memprediksikan kecepatan reaksi.



Gambar 2.4 Menggambarkan konsep dari energi aktivasi

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose^[4] telah diolah kembali

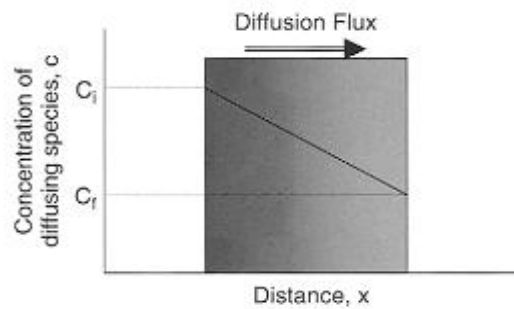
Bagian yang utamanya adalah paduan tersebut, Al sebagai energi bebas (diletakkan pada garis vertikal, sedangkan garis mendatarnya sebagai koordinat “reaksi”), titik minimum dari parabola disebut “*Initial State*”. Lengkungan pada parabola tersebut tergantung dari energi bebas yang terkandung dalam komposisi paduan. Hasil akhirnya adalah oksidasi Al_2O_3 yang sangat berhubungan dengan

energi bebas digambarkan pada parabola yang lain sebagai “*Final State*”. Perubahan energi bebas dalam proses oksidasi ini dilambangkan dengan ΔG , perbedaan antara “*Final State*” dan “*Initial State*”. Langkah yang terdapat dibagian tengah tidak dapat diprediksi dengan konsep termodinamika, karena konsep termodinamika hanya membicarakan terjadinya reaksi oksidasi berdasarkan ΔG negatif, jika nilainya negatif maka terjadi reaksi^[4].

Diantara keadaan awal dan akhir tersebut ada tahapan diantaranya, yang meliputi langkah-langkah masuknya molekul oksigen kedalam atom, penyerapan dari atom-atom oksigen yang terlepas pada permukaan material, perpindahan atom ke energi yang lebih rendah, pembentukan oksida sementara, difusi Al ke permukaan dan perubahan dari oksida sementara ke oksida yang lebih stabil. Langkah-langkah tersebut memerlukan energi dari luar. Besarnya energi yang dibutuhkan dapat dilihat dari tingginya “bukit” ΔG_{aktiv} , diantara dua parabola. Supaya proses oksidasi ini dapat berlangsung dengan baik, maka sistem ini memerlukan suatu energi diatas dari “bukit” energinya^[4].

2.3.2 Difusi

Difusi adalah suatu proses perpindahan massa melalui suatu zat. Pada pembahasan disini akan lebih fokus terhadap perpindahan massa melalui zat padat. Umumnya ada tiga mekanisme untuk terjadinya difusi pada zat padat. Pertama, diketahui sebagai difusi volume, atom berdifusi ke daerah yang kosong akan atom (*vacancies*). Mekanisme yang kedua adalah modifikasi dari mekanisme yang pertama yang mana atom-atom akan berpindah ke lokasi cacat, seperti dislokasi, permukaan dan batas butir. Mekanisme yang ketiga meliputi perpindahan atom melalui celah (*interstitial atomic sites*). Kekuatan yang menggerakkan proses difusi ini adalah penurunan dari energi bebas. Dalam prakteknya difusi terjadi dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang rendah (Gambar 2.5)



Gambar 2.5 Difusi terhadap tingkat konsentrasi

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose ^[4]telah diolah kembali

Laju difusi sangat dipengaruhi temperatur dan dapat dituliskan rumusnya sebagai berikut :

$$D = D_0 \exp (-\Delta H/RT) \quad (2.1)$$

Dimana D_0 adalah konstan, yang meliputi faktor-faktor lain, frekuensi lompatan dari atom-atom dan ΔH adalah energi aktivasi dari proses difusi. Biasanya, nilai relatif dari laju difusi dapat diurutkan sebagai berikut :

$$D_{\text{permukaan}} > D_{\text{batas butir}} > D_{\text{volume}}$$

atau tingkatan dari energi aktivasinya.

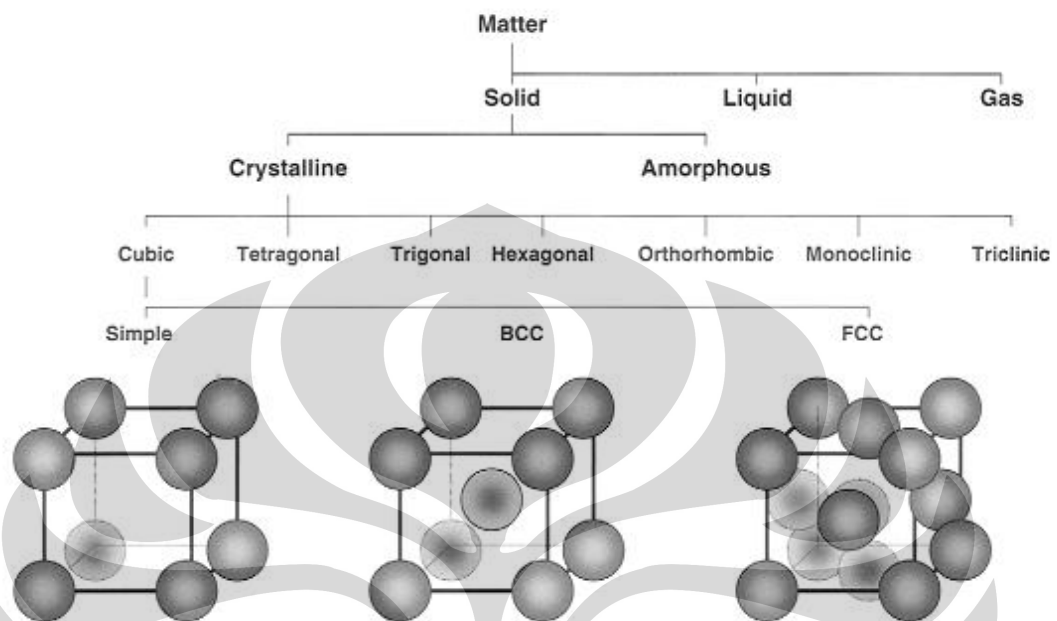
$$\Delta H_{\text{permukaan}} < \Delta H_{\text{batas butir}} < \Delta H_{\text{volume}}$$

Berdasarkan urutan diatas dapat diketahui bahwa difusi dominan terjadi pada permukaan, sepanjang batas butir atau butir secara berurutan. Membandingkan suatu laju difusi sangat penting karena dengan begitu dapat diketahui sifat-sifat dari *coating* yang akan diberikan. *Coating* umumnya bentuknya sangat halus bila dibandingkan dengan material dasarnya^[4].

2.4 STRUKTUR KRISTAL

Konsep fasa dan struktur kristal sangat penting diketahui untuk mengetahui sifat-sifat *coating* yang akan diberikan. Gambar 2.6 dapat mengilustrasikan beberapa konsep ini. Ada tiga jenis zat yang telah dikenal, tetapi disini akan lebih

difokuskan pada zat padat, yang terbagi dalam dua bentuk yaitu amorfus seperti gelas dan kristalin seperti berlian.

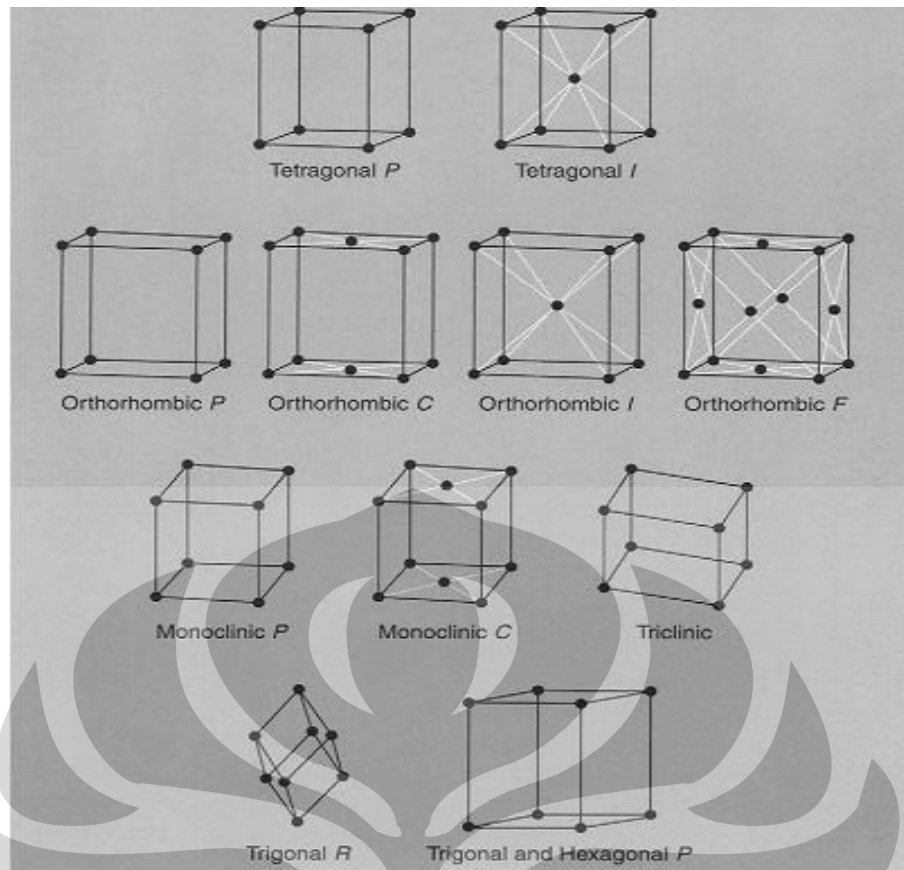


Gambar 2.6 Struktur kristal dan susunan atomnya.

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose ^[4]telah diolah kembali

Material kristalin disusun dari berbagai “motif” atom, ion-ion atau molekul disusun secara tiga-dimensi yang biasa disebut dengan kisi (*lattice*). Unit terkecil dari susunan dalam kisi kristal disebut dengan unit sel. Berdasarkan ukuran dan bentuk dari unit selnya, struktur kristalin dapat diklasifikasikan kedalam tujuh sistem kristal (Gambar 2.7).

Kebanyakan logam memiliki sistem kubik kristal yang mana unit selnya berbentuk kubus. Dalam beberapa logam dan kebanyakan keramik, atom-atom disusun dalam suatu unit sel yang bentuknya tidak kubik seperti *hexagonal* atau *orthorhombic*. Dalam sistem kubik pengaturan susunan atomnya ada tiga kemungkinan, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.7 Tujuh sistem kristal dan kisi kristalnya

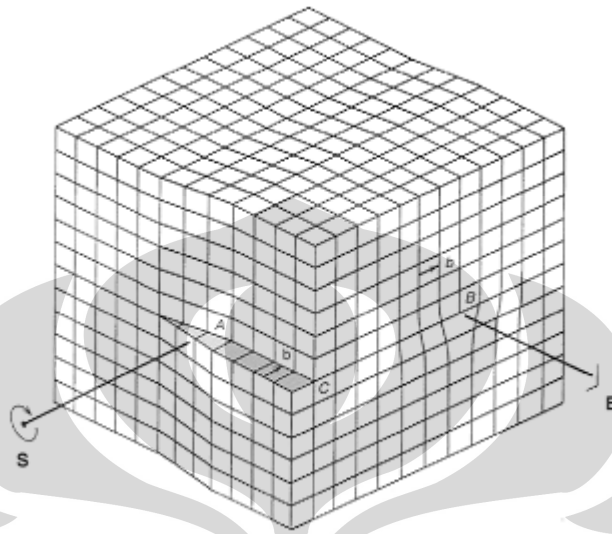
Sumber : Charles Kittel, Introduction to Solid State Physics, 5th ed.^[7] telah diolah kembali

Pada *simple cubic* (sc) setiap unit sel memiliki delapan atom disetiap sudutnya. Setiap sudut dibagi dengan delapan unit sel. Maka total atom yang “dimiliki” oleh setiap unit sel adalah satu atom. Sedangkan pada unit sel bcc, atom disetiap sudutnya dibagi dengan delapan unit sel tetangganya, dan ditengahnya ada satu atom hanya untuk satu unit sel, sehingga total atom yang dimiliki struktur bcc adalah dua atom setiap unit sel^[4].

Cacat Pada Struktur Kristal

Walaupun secara teorinya struktur kristal pada logam tampak begitu sempurna, tetapi dalam kenyataanya struktur kristal tersebut memiliki berbagai jenis cacat. Kadang-kadang atom mengalami kegagalan untuk membentuk struktur yang ideal, sehingga hal ini akan menciptakan suatu kekosongan (*vacancies*) pada suatu posisi atom yang seharusnya terisi oleh atom disebut dengan titik cacat. Kekosongan inilah yang akan menjadi bagian terpenting dalam membantu proses difusi. *Dislocation* adalah bagian lain dari suatu

ketidaksempurnaan struktur, biasa disebut dengan cacat garis, yang mana kisi struktur kristal terdistorsi sepanjang garis, ditunjukkan pada Gambar 2.8. *Dislocation* sebenarnya terjadi selama proses pembekuan^[4].



Gambar 2.8 Skematik dari *edge* (E) dan *screw dislocations* (S)

Sumber : William D. Callister, Jr. *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 3rd ed.^[8]
telah diolah kembali

2.5 OKSIDASI

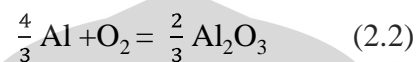
Oksidasi adalah suatu fenomena lingkungan yang mana logam dan paduannya terkena secara langsung gas oksigen atau gas-gas lain pada temperatur tinggi sehingga beberapa dari unsur logamnya berubah menjadi oksidanya. Oksida dapat membentuk suatu kerak pelindung jika oksida tersebut dapat berikatan dengan material dasar dan dapat mengurangi oksidasi selanjutnya atau tidak mudah terlepas. Selain itu juga dapat terjadi oksidasi internal. Dampak terjadinya oksidasi pada suatu material adalah dapat menurunkan sifat mekanisnya seperti kemampuan menahan beban, sehingga hasilnya akan terjadi kegagalan pada komponen.

Oksidasi dapat terjadi karena adanya atmosfer oksidasi seperti O_2 , CO_2 , H_2O , NO_2 dan kombinasinya, pada temperatur tinggi pada waktu yang bervariasi. Selanjutnya akan terjadi perubahan berat. Komposisi dari gas yang mengoksidasi

akan mempengaruhi komposisi oksida, morfologi, ikatan dan ketahanan terhadap pengelupasan oksida^[4].

Proses Oksidasi

Kebanyakan logam dapat teroksidasi dengan mudah karena perubahan energi bebasnya ΔG bernilai negatif. Contohnya adalah oksidasi aluminium akan membentuk aluminium oksida :



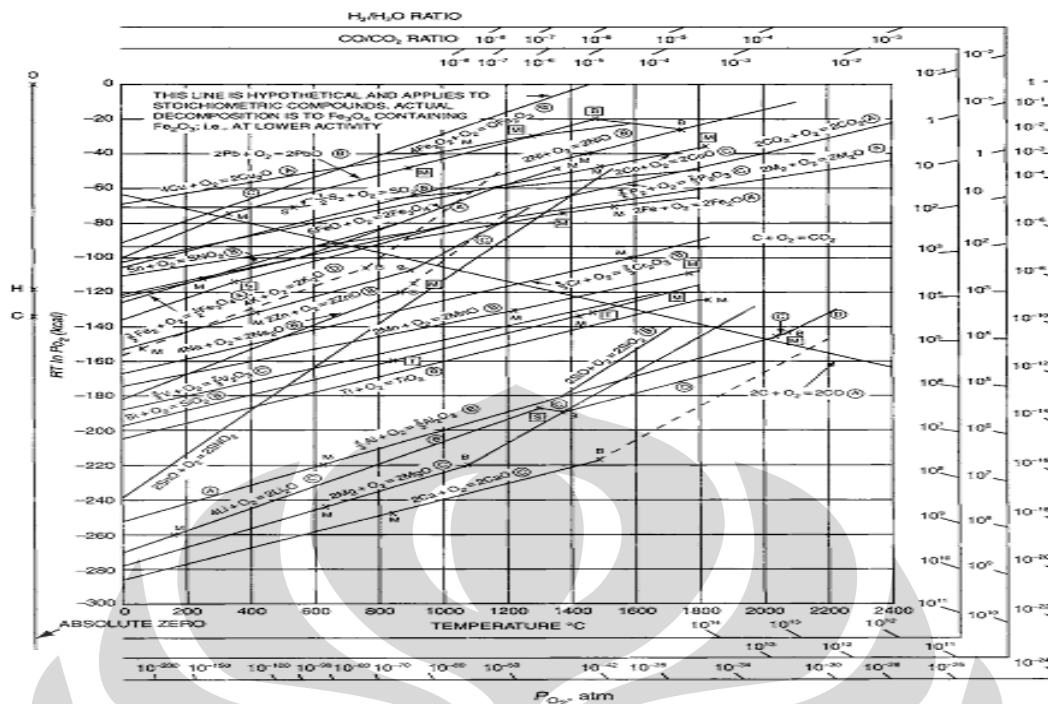
$\Delta G = -251,8$ kcal/mole pada temperatur ruang dan tekanan 1 atm

A. Efek Temperatur

Ketika logam berada pada keadaan standar (masih dalam keadaan padat pada 298K, 77°F) bereaksi dengan oksigen pada kondisi yang standar juga (tekanan 1 atm dan 298K) akan membentuk suatu oksida dalam keadaan standar (murni padatan pada 298K), energi yang dilepas dituliskan ΔG° . Perubahan energi bebas berhubungan dengan perubahan entalpi dan entropi perubahannya dituliskan $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$. Variasi dari ΔG° dengan temperturnya ditunjukkan pada diagram “*Ellingham*” Gambar 2.9.

Beberapa karakterisasi dari oksidasi yang dapat dengan jelas pada Gambar 2.9 :

- Logam mulia berada pada bagian atas diagram, hal ini menunjukkan bahwa logam tersebut kurang reaktif dan oksidasi dapat dengan mudah dikurangi.
- Garis miring yang dituliskan $d(\Delta G^\circ)/dT = d(\Delta H^\circ - T\Delta S^\circ)/dT \approx -\Delta S^\circ$. ΔH° sangat tidak sensitif terhadap temperatur. Untuk lebih jelasnya dapat diambil contoh pembentukan oksida aluminium,



Gambar 2.9 Diagram Ellingham dari energi bebas untuk membentuk oksida terhadap fungsi waktu

Sumber : F.D. Richardson and J. H. E. Jeffers, J. Iron Steel Inst. The Metals Society^[9] telah diolah kembali

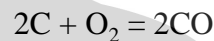
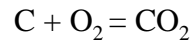
$$\Delta S^\circ = S\left(\frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_3\right) - S\left(\frac{4}{3}\text{Al}\right) - S(\text{O}_2) \quad (2.3)$$

dimana S adalah absolute entropi.

Disini dapat dibuat suatu pendekatan, karena keduanya adalah padatan yaitu alumunium dan oksidanya, memiliki susunan yang padat, oleh karena itu nilainya lebih kecil dibandingkan dengan gas oksigen, sehingga dapat dihilangkan maka persamaan diatas menjadi $\Delta S^\circ = - S(\text{O}_2)$. Maka kemiringan dari garis pada diagram Ellingham dengan entropi 1mol oksigen^[4].

- Titik lebur memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap kemiringan garis karena perubahan entropi yang kecil

- Perubahan yang melalui fasa penguapan dan sublimasi memiliki pengaruh yang kuat terhadap kemiringan garis karena memiliki perubahan ΔS° yang besar.
- Pengecualian untuk kemiringan positif yang terdapat dalam suatu reaksi baik pada reaktan atau produknya terdapat gas seperti pada reaksi berikut :



Untuk reaksi pertama, $\Delta S^\circ = S(CO_2) - S(C) - S(O_2) \approx S(CO_2) - S(O_2)$, karena karbon berwujud padatan, $S(C) \approx 0$. CO_2 dan O_2 diasumsikan wujudnya adalah gas, sehingga akan memiliki nilai entropi yang sama dan dapat saling menghilangkan $\Delta S^\circ \approx 0$. Untuk reaksi kedua, diberikan reaksi yang sama $\Delta S^\circ = 2S(CO) - 2S(C) - S(O_2) \approx 2S(CO) - S(O_2) \approx S(CO)$, sehingga akan menghasilkan suatu kemiringan yang negatif.

- Kemiringan yang positif pada diagram Ellingham menunjukkan bahwa sebagian besar oksida kurang stabil pada temperatur tinggi.

B. Efek Tekanan

Sebagai contohnya dapat dilihat pada reaksi aluminium dengan satu mol oksigen akan membentuk oksida aluminium. Reaksi ini terjadi pada keadaan standar karena perubahan energi bebas negatif. Kesetimbangan dari reaksi dituliskan sebagai berikut :

$$K = \frac{[Al_2O_3]^{2/3}}{[Al]^{4/3} P_{O_2}} \quad (2.4)$$

$[\]$ menunjukkan konsentrasi, dan P adalah tekanan. Untuk Al murni dan Al_2O_3 , $[Al_2O_3]$ dan $[Al]$ dapat diasumsikan menjadi satu kesatuan. Oleh karena itu $K = 1/P_{O_2}$, maka $\Delta G^\circ = -RT \ln K = RT \ln P_{O_2}$ atau $P_{O_2} = \exp(\Delta G^\circ/RT)$.

Pada 1000K (1340°F), dari Gambar 2.9, nilai ΔG° Al_2O_3 sekitar -215,000 cal/mol oksigen, setelah nilai ΔG° dimasukkan kedalam persamaan diatas maka

didapatkan nilai = 6×10^{-48} atm. Apakah yang dimaksud dengan angka tersebut ?. Hal ini artinya bahwa pada temperatur 1000K, aluminium padatan tidak akan teroksidasi jika tekanan dari oksigen kurang dari 6×10^{-48} atm. Pada kondisi vakum semua peralatan memiliki tekanan oksigen yang lebih besar dari nilai yang ditetapkannya, sehingga tidak mungkin melindungi aluminium dari oksidasi. Pada aluminium yang sudah terkena oksidasi maka akan terbentuk kerak pada permukaan yang menjadikannya susah ditembus oleh difusi oksigen pada temperatur tertentu^[4].

C. Kinetika Oksidasi

Pada konsep termodinamika yang dijadikan perhatian adalah perubahan energi bebas untuk menentukan suatu produk oksidasi, tidak dapat menentukan kecepatan dari reaksi oksidasi tersebut. Padahal ada langkah-langkah yang dilakukan untuk membentuk suatu oksida yang tidak dapat ditunjukkan pada konsep termodinamika. Dibawah ini adalah langkah-langkah terjadinya oksidasi ^[4]:

- Molekul oksigen menyerap ke dalam permukaan logam
- Molekul oksigen akan terpisah menjadi atom-atom oksigen
- Atom oksigen bermigrasi ke daerah yang memiliki energi lebih rendah pada permukaan logam
- Terbentuk lapisan-lapisan hasil penyerapan atom-atom tersebut.
- Mulai tumbuh oksida dan semakin besar untuk membentuk lapisan oksida sementara
- Oksigen atau ion-ion logam terdifusi ke dalam film untuk membentuk lapisan oksida yang stabil

D. Tingkat Perlindungan Kerak Oksida

Kerak Oksida dapat melindungi terhadap oksida lanjutan, mencegah difusi oksigen. Indikator yang dapat menyatakan tingkat perlindungan dari kerak oksida ini dinamakan *Pilling-Bedworth Ratio* (PBR). $PBR = \text{Volume oksida yang terbentuk} / \text{Volume dari logam yang terpakai} = 1/n[(m/r')/(M/R')]$, dimana m dan M adalah berat molekul dan berat atom dari oksida dan logam, r' dan R adalah

kerapatan dan n adalah nomor atom logam yang terdapat dalam molekul oksida. Nilai PBR dari beberapa oksida logam dan tingkat perlindungannya dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut :

Table 2.1 PBR dari Beberapa Oksida Logam

Sistem	PBR	Tingkat Perlindungan
Al/Al ₂ O ₃	1.28	P
Cr/Cr ₂ O ₃	1.99	P
Si/SiO ₂	2.15	P
Ca/CaO	0.64	NP
Ta/Ta ₂ O ₅	2.47	NP

P = Melindungi; NP = Tidak Melindungi

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

Jika $PBR \ll 1$, volume dari oksida yang terbentuk kurang dari volume logam yang digunakan oleh karena itu oksida ini bersifat kurang melindungi. Jika $PBR \sim 1$ maka kerak oksidanya bersifat melindungi. Jika $PBR \gg 1$ volume oksida yang terbentuk lebih besar daripada volume logam yang digunakan. Kerak oksida akan mendapatkan tekanan yang tinggi, sehingga oksida tersebut menjadi melengkung dan terlepas kemudian permukaan logam menjadi bersentuhan langsung dengan lingkungan dan terkena oksidasi lanjutan. Oleh karena itu untuk membuat oksida yang dapat melindungi, nilai PBR harus mendekati 1. Tetapi ada beberapa pengecualian terhadap prediksi nilai PBR untuk suatu perlindungan yaitu mengenai pengaruh ukuran, uap oksida dan efek kimia dari suatu paduan. Hal-hal ini juga harus diperhatikan jadi tidak hanya dari nilai PBR saja^[4].

2.6 Oksidasi pada Paduan

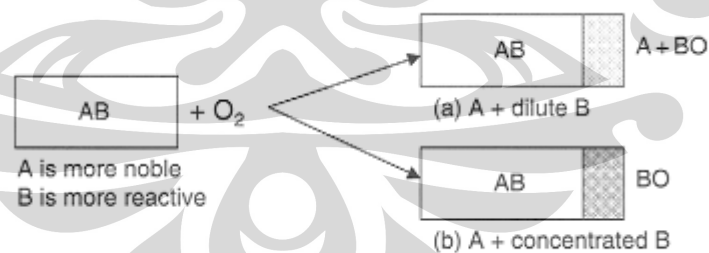
Material logam jarang digunakan dalam keadaan yang murni dalam aplikasinya, khususnya pada temperatur tinggi karena kekuatannya rendah dan tidak tahan terhadap lingkungan. Untuk aplikasi dibidang keteknikan, logam-logam diperkuat dengan menambahkan paduan. Mekanisme dasar terjadinya oksidasi pada logam murni (tanpa paduan) juga akan terjadi pada logam yang

telah dipadu dengan tambahan kerumitan tertentu. Kerumitan ini meliputi pembentukan oksida yang bermacam-macam, oksida campuran, oksida *internal* dan interaksi difusi dengan logam. Efek paduan terhadap sifat-sifat oksidasi dapat dimengerti dengan mengibaratkan suatu paduan AB, A adalah komponen yang utama dan B adalah komponen minor^[10].

Binary Alloy System

Contoh kasus 1 :

Pada gambar 2.10 Unsur A adalah lebih stabil dan B lebih reaktif. Oleh karena itu pada lingkungan yang mengandung gas oksigen (tekanan atmosferik), A tidak akan membentuk AO (tekanan oksigen terlalu rendah), oleh karena itu B akan teroksidasi menjadi BO. Sekarang terdapat dua situasi yang berbeda jika terdapat perbedaan konsentrasi B pada A. Pada gambar 2.10 (a) paduan melarut di dalam B. Diasumsikan oksigen dapat melarut dengan baik pada paduan tersebut, oksigen akan berdifusi untuk membentuk oksida *internal* dan membentuk endapan-endapan BO yang tersebar di dalam A, karena unsur B tidak mencukupi, pertumbuhan kerak BO tidak akan berlanjut. Pada kasus 2.10 (b) paduan terkonsentrasi pada B. Pada kasus 2.10 (b) unsur B mencukupi untuk terbentuknya oksida lanjutan BO^[11].



Gambar 2.10 Binary alloy oxidation : A lebih stabil dan B lebih reaktif

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

Contoh kasus 2 :

Pada kasus ini unsur A dan B keduanya adalah reaktif terhadap oksigen dengan BO lebih stabil dibandingkan AO. Konsentrasi dari unsur B akan mempengaruhi pembentukan oksida. Jika paduan dapat melarut dengan B, dapat dilihat pada Gambar 2.11 (a) oksida stabil AO akan terbentuk dibagian paling luar. Dibawah lapisan oksida tersebut akan terbentuk juga kerak oksida, diantara AO dan antamuka paduan, aktifitas O_2 yang cukup tinggi sehingga dapat mengoksidasi B kedalam endapan BO. Pada Gambar 2.11 (b) konsentrasi B melebihi titik kritis untuk membentuk kerak BO. Kasus (b) inilah yang akan menjadi dasar untuk membuat paduan dan *coating* yang tahan terhadap temperatur tinggi. Kecepatan pertumbuhan oksida tergantung bagaimana kerak BO melindungi logam dasarnya dan kehadiran unsur-unsur paduan lain^[11].

2.7 FUNGSI KHUSUS UNSUR-UNSUR PADUAN LAIN

A. Alumunium

Alumunium sangat jelas pengaruhnya terhadap ketahanan terhadap oksidasi, dengan cara meningkatkan konsentrasi penggunaannya, tetapi bila terlalu banyak konsentrasinya dapat menurunkan titik lebur suatu material^[12].

B. Chromium

Penambahan unsur ini dalam suatu paduan akan meningkatkan ketahanan terhadap *hot corrosion* dan meningkatkan aktifitas alumunium, *chromium* secara efektif akan mengurangi difusi oksigen kedalam paduan dengan cara menurunkan aktifitas oksigen diantara kerak oksida dan permukaan logam paduan.

C. Cobalt

Umumnya ketahanan terhadap oksidasi akan meningkat dengan penurunan konsentrasi dari *cobalt*. Laju pertumbuhan dari CoO biasanya lebih besar daripada pertumbuhan NiO. Maka untuk membentuk lapisan pelindung Al_2O_3 tidak diperkenankan menggunakan unsur Co dengan konsentrasi yang tinggi karena unsur ini akan lebih cepat membentuk kerak CoO dibandingkan oksida Al_2O_3

D. Silikon

Silikon memiliki pengaruh yang menguntungkan karena dapat membentuk kerak SiO_2 dibawah kerak yang utama, sehingga sifat perlindungannya jadi lebih baik. Tetapi penambahan Si cenderung membuat material menjadi lebih rapuh. Si juga biasa ditambahkan pada suatu *coating*.

E. Boron

Boron memiliki efek yang sangat merugikan terhadap ketahanan oksidasi. Boron lebih cenderung membentuk kerak NiO dibandingkan membentuk Al_2O_3 . Boron dalam *substrate* material paduan juga memberikan efek yang negatif terhadap pembentukan *coating* karena unsur ini akan mengendap pada *coating*.

F. Titanium

Titanium dapat meningkatkan ketahanan oksidasi pada FeCrAl^[13]. Tetapi penambahan sejumlah Ti kedalam paduan Ni pada beberapa jenis tidak akan memberikan efek yang sebanding. Ti seperti diketahui akan meningkatkan laju pertumbuhan Al_2O_3 dan memberikan efek yang merusak pada ikatan kerak yang berdifusi dengan material dasar.

G. Mangan

Mangan akan mendukung pembentukan Cr_2O_3 pada paduan Ni-Cr. Penambahan mangan seperti diketahui juga akan mendukung pembentukan kerak Al_2O_3 pada paduan Fe-Al.

H. Tantalum, Molybdenum, Tungsten

Tantalum pada konsentrasi yang sedikit dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi. Unsur-unsur ini adalah salah satu penyusun refraktori oleh karena itu akan mengurangi laju difusi aluminium pada permukaan.

I. Unsur Reaktif terhadap Oksigen

Unsur-unsur tersebut Y, Hf, La, Sc, Ce dan Zr yang telah diketahui adalah unsur yang reaktif terhadap oksigen karena oksida unsur-unsur tersebut lebih stabil dibandingkan dengan kerak oksida yang terbentuk dari kebanyakan paduan logam ketika berada pada lingkungan temperatur tinggi. Kehadiran unsur-unsur ini akan meningkatkan daya rekat oksida Al_2O_3 sebaik oksida Cr_2O_3 pada substrate paduan logam, walaupun laju pertumbuhan kedua oksida tersebut berbeda. Laju pertumbuhan Cr_2O_3 akan menurun, sedangkan laju pertumbuhan Al_2O_3 tidak akan mengalami perubahan yang berarti. Jadi fungsi utama dari unsur-unsur ini adalah untuk meningkatkan sifat adesif antara logam dasar dengan *coating* agar *coating* tidak mudah terlepas^[13].

J. Pengurangan Kandungan Sulfur

Sulfur hampir selalu ada pada *coating* dan material paduan. Selama oksidasi, sulfur akan bersegregasi pada antarmuka material dasar dan oksida, hal ini akan menyebabkan penurunan kekuatan ikatan kerak oksida pada material dasarnya. Menghilangkan kandungan sulfur ini dapat dilakukan dengan cara *annealing* pada temperatur tinggi dengan kondisi vakum^[13].

2.8 PRINSIP PERLINDUNGAN TERHADAP KOROSI TEMPERATUR TINGGI

Untuk melindungi logam dari korosi temperatur tinggi umumnya bergantung pada pembentukan kerak oksida yang bersifat protektif pada permukaan material logam selama proses berlangsung. Ada dua cara utama yang biasa digunakan untuk membentuk kerak protektif. Pertama dengan cara menambahkan unsur paduan, yang bertujuan untuk membentuk oksida yang protektif. Selama proses aplikasi berlangsung, unsur ini akan dikorbankan supaya terjadi oksidasi sehingga logam dasarnya menjadi terlindungi. Unsur yang biasa digunakan adalah Al, Cr atau Si. Bagaimanapun, penambahan unsur-unsur tersebut pada struktur logam kadang-kadang dapat menyebabkan kerusakan pada sifat-sifat material, seperti sifat mekanis yang sangat krusial pada temperatur

tinggi. Solusinya adalah dengan menambahkan unsur tersebut hanya pada permukaannya saja. Cara ini disebut dengan *coating* temperatur tinggi^[14].

2.9 COATING UNTUK OKSIDASI DAN KOROSI TEMPERATUR TINGGI

Pada zaman yang maju sekarang ini banyak material digunakan pada kondisi temperatur tinggi untuk berbagai macam proses, oleh karena itu harus dapat mengoptimalkan sifat-sifat seperti *tensile*, *creep*, dan kekuatan fatik, selain itu juga struktur mikronya harus stabil pada temperatur tinggi. Oleh karena itu diperlukan perlindungan terhadap suatu material agar sifat-sifat tersebut tetap ada walaupun kondisi kerjanya pada temperatur tinggi, selain itu juga untuk melindungi dari korosi dan oksidasi

2.9.1 Coating Logam

Untuk mendapatkan perlindungan dari suatu oksidasi diperlukan *coating* yang bersifat logam yang dapat membentuk suatu lapisan pada permukaan material dasar, yang akan membatasi masuknya oksigen dan garam-garam yang dapat menyebabkan oksida. Dibawah ini adalah beberapa persyaratan yang diperlukan untuk membuat suatu *coating*^[15;16].

Ketahanan terhadap Oksidasi/Korosi

- Stabil secara termodinamika, membentuk kerak pelindung yang memiliki ketebalan yang sama.
- Laju pertumbuhan yang lama pada saat pembentukan kerak dipermukaan
- Keraknya harus dapat berikatan dengan material dasar

Stabilitas

- Tidak mengalami perubahan fasa karena adanya *coating*
- Laju difusi yang melalui permukaan rendah pada saat temperatur penggunaan
- Memiliki kestabilan komposisi
- Meminimalkan terbentuknya fasa yang rapuh

Adesi

- Daya ikat yang baik antara *coating* dan substrate
- Memiliki sifat yang cocok antara *coating* dan substrate untuk mengurangi *thermal stress*
- Meminimalisir timbulnya tegangan
- Mengoptimalkan kondisi permukaan (kasar atau halus)

Sifat Struktural

Dapat menahan terjadinya *creep*, fatik dan beban impact pada permukaan tanpa mengalami kegagalan.

Bagian Utama Dalam *Coating* dan Perannya

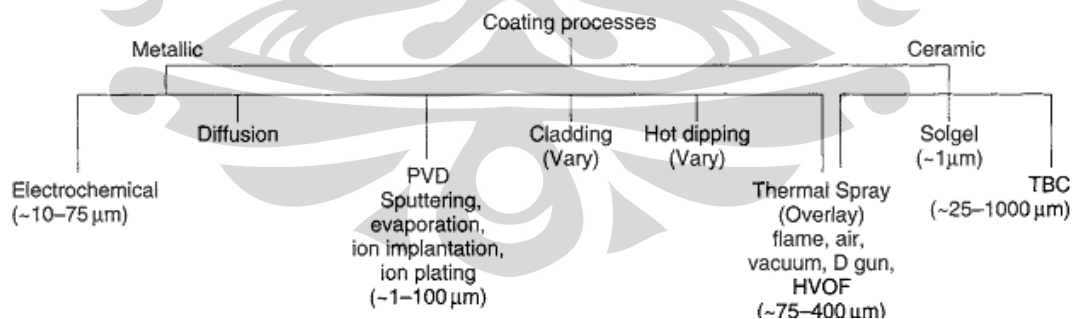
Coating menyesuaikan aplikasi dari suatu material, oleh karena itu harus diatur komposisinya, struktur mikro dan proses manufakturnya. Beberapa unsur penting yang digunakan untuk pembuatan *coating* dan pengaruhnya dapat dilihat pada Tabel 2.2^[15].

Tabel 2.2 Unsur-unsur pada *coating*, fungsi dan pengaruhnya.

Unsur	Manfaat	Kekurangan
Ni	Memberikan kekuatan	Selalu mengalami kerusakan ketika berinteraksi dengan sulfur
Co	Memberikan kestabilan struktur mikro dan kekuatan	Selalu mengalami kerusakan ketika berinteraksi dengan sulfur
Al	Memberikan kekuatan dan meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi	Bila kandungan terlalu besar dapat menurunkan titik lebur
Cr	Meningkatkan ketahanan oksidasi sampai dengan 816°C.	Menurunkan ketahanan

	Mendukung terbentuknya kerak alumina	terhadap <i>creep</i>
Ta	Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan <i>hot corrosion</i>	
Si	Meningkatkan ketahanan oksidasi dan <i>hot corrosion</i>	Konsentrasi terlalu besar akan membentuk fasa yang getas
Hf, Y, Y ₂ O ₃	Meningkatkan ikatan dari kerak alumina dan krom	Kandungan terlalu besar dapat menyebabkan kerusakan
Pt	Memperbaiki ketahanan oksidasi dan ketahanan terhadap <i>hot corrosion</i>	

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali



Gambar 2.11 Macam-macam proses *coating*

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

2.9.2 Proses *Coating*

Terdapat banyak jenis proses *coating* yang telah dikenal dan semua proses tersebut bertujuan untuk memberikan perlindungan terhadap permukaan. Pemilihan proses ini tergantung dari desain dan aplikasi dari komponen yang akan di-*coating*. Untuk contoh *coating* yang diperlukan untuk *hot corrosion* tidak akan optimal bila menggunakan *coating* untuk ketahanan terhadap oksidasi. Gambar 2.11 adalah daftar beberapa proses *coating*, dan disini hanya akan membahas tentang *diffusion coating*^[4]

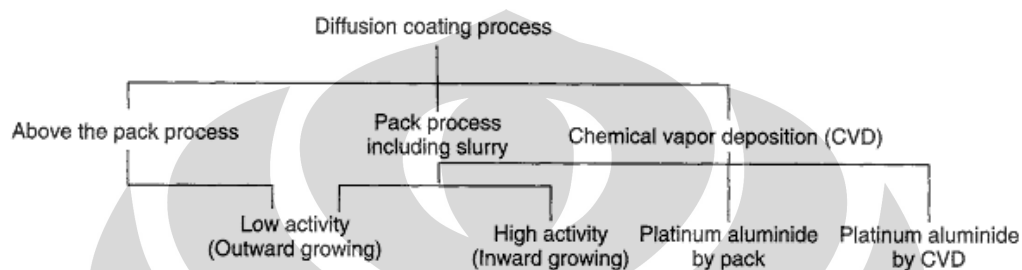
2.9.3 *Diffusion Coating*

Diffusion Coating terdiri dari permukaan substrate yang dilapisi kerak oksida yang terbentuk dari Al, Cr, Si atau kombinasi dari unsur-unsur tersebut yang memiliki ketebalan 10 sampai 100 μm ^[17,18]. Unsur-unsur tersebut akan menyatu dengan unsur utama dari suatu material paduan untuk membentuk fasa intermetalik. Untuk contoh, pada Ni *base superalloy*, permukaan akan diperkaya dengan aluminium untuk membentuk *nickel aluminide*, NiAl yang akan menjadi senyawa yang utama pada lapisan *coating*. Substrate material akan ikut berpengaruh dalam pembentukan *diffusion coating*. Untuk melindungi terhadap oksidasi, *diffusion coating* yang dipilih adalah *aluminide*, yang mana akan membentuk kerak alumina yang bersifat melindungi substrate pada temperatur tinggi. *Coating* ini dapat diaplikasikan pada komponen yang memiliki bentuk yang rumit. Proses ini berlangsung pada temperatur tinggi. Setelah dilakukan *coating* maka perlu dilakukan perlakuan panas untuk mengembalikan sifat mekanis seperti *creep* dan kekuatan fatik. *Diffusion coating* dapat dilakukan dengan beberapa proses yang akan dijelaskan pada gambar 2.12. Proses dasar difusi *coating* memiliki beberapa langkah :

- Terbentuk uap yang mengandung Al, Cr atau Si
- Perpindahan uap ke permukaan komponen
- Reaksi uap dengan substrate paduan diikuti dengan proses difusi dengan material paduan

- Dilakukan perlakuan panas untuk mendapatkan hasil *coating* yang diinginkan dan sifat mekanis yang baik

Ketebalan *coating* tergantung dari substrate paduan, parameter proses ini meliputi temperatur dan perlakuan panas^[4].



Gambar 2.12 Macam-macam proses difusi coating

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

2.9.3.1 Pack Coatings

Aluminiding pada paduan berbasis Ni

Aluminide coating bergantung kepada pembentukan βNiAl pada permukaan komponen. Ada tiga proses utama untuk membentuk *aluminide*. Proses tersebut adalah *pack*, *above the pack* dan *chemical vapor deposition (CVD)*. Selain itu ada variasi dari *pack process*, yang disebut “*slurry*” coating, menggunakan *slurry coating* dengan cara menambahkan air/fluida kedalam material *pack* untuk dilapiskan ke permukaan. Salah satu proses yang paling sering digunakan adalah proses pembentukan uap yang mengandung aluminium atau unsur logam lainnya yang digunakan sebagai *coating*. Uap tersebut adalah halida yang tetap karena uap tersebut memiliki tekanan uap yang tinggi. Uap tersebut akan bereaksi dengan substrate untuk membentuk *aluminide coating*. Setelah itu dilakukan perlakuan panas untuk menghasilkan *coating* yang diinginkan. Perbedaan dari proses-proses pada Gambar 2.12 adalah dalam menciptakan uap halida dan proses perpindahannya ke permukaan komponen. Dalam *pack process*, komponen akan dikubur didalam serbuk-serbuk *coating*, kemudian dipanaskan dalam sebuah

oven. Serbuk-serbuk ini akan menghasilkan uap halida. Sedangkan pada *above-the-pack*, komponen tidak bersentuhan langsung dengan serbuk-serbuk *coating*. Uap halida tersebut dapat dengan mudah menjangkau permukaan internal dan eksternal dari komponen. Pada CVD process, uap halida dihasilkan dari luar dengan menggunakan generator khusus dan kemudian uap tersebut akan menuju komponen yang terdapat didalam reaktor yang sedang dipanaskan. Berdasarkan pembentukannya, *coating* dibagi menjadi 2 kelompok besar, yaitu (i) *Overlay coating*, dan (ii) *diffusion coating*. Dalam *overlay coating*, material yang telah diatur komposisi kimianya seperti yang diinginkan dilapiskan dipermukaan substrat, melalui teknik-teknik seperti *spray coating*, *physical vapor deposition* (PVD) dan *cladding*. Di lain pihak dalam *diffusion coating*, lapisan (*coating*) tumbuh sebagai hasil interaksi (interdifusi) atau reaksi antara unsur-unsur yang diendapkan dengan unsur-unsur yang ada di dalam substrat. Bila proses pembentukan *overlay coating* dapat berlangsung pada temperatur rendah, maka dalam *diffusion coating* proses pembentukan *coatingnya* telah cukup signifikan, yaitu kira-kira lebih dari 750°C. *Diffusion coating* dapat dihasilkan dengan teknik *chemical vapor deposition* (CVD) dan *pack-cementation*^[4].

Dalam tulisan ini akan dibahas secara singkat proses pembentukan *coating* untuk tujuan proteksi terhadap korosi temperatur tinggi melalui proses *pack cementation*. *Pack cementation* ini memiliki beberapa keuntungan, yaitu : dapat melakukan *coating* dengan bentuk komponen yang lebih rumit, selain itu karena *pack* dan komponen saling bersentuhan langsung maka *coating* yang akan dihasilkan akan memiliki komposisi *coating* yang seragam. Lebih khusus, substrat yang dibahas adalah *superalloy* nikel sehingga material dasar *coatingnya* adalah β -NiAl. Oleh sebab itu proses *pack-aluminizing* dan *coatingnya* disebut *pack-aluminide coating*.

2.9.3.2 Pack Cementation Process

Prinsip Kerja

Pack Cementation merupakan pengembangan atau modifikasi dari metode CVD (*Chemical Vapour Deposition*) yangmana substrat akan dicoating didalam

sebuah tabung dan akan dikelilingi campuran serbuk, yang terdiri dari serbuk logam yang akan diendapkan (*master alloy*), *activator* dan *inert filler*. Tabung kemudian akan dipanaskan sampai temperatur yang diinginkan dalam kondisi lingkungan *inert*. Pada kondisi ini *master alloy* akan bereaksi dengan *activator* membentuk sistem pengangkutan gas. Proses difusi ini akan melalui *pack* ke permukaan substrat kemudian akan menempel disana, membiarkan unsur logam terdeposisi untuk menembus kedalam substrat melalui *solid state diffusion*^[14].

Sejarah dari Pack Cementation Process

Pertama kali “*cementation process*” diperkenalkan oleh Allison dan Hawkins pada tahun 1914, yangmana mengendapkan Al pada besi dan baja, Pada tahun 1960 proses ini dikembangkan untuk membuat lapisan *coating* pada sudu turbin yang terbuat dari *superalloy-Ni base*. Kemudian proses ini dikembangkan lagi untuk dapat membuat suatu lapisan *coating* pada material berbasis Co dan Fe^[14].

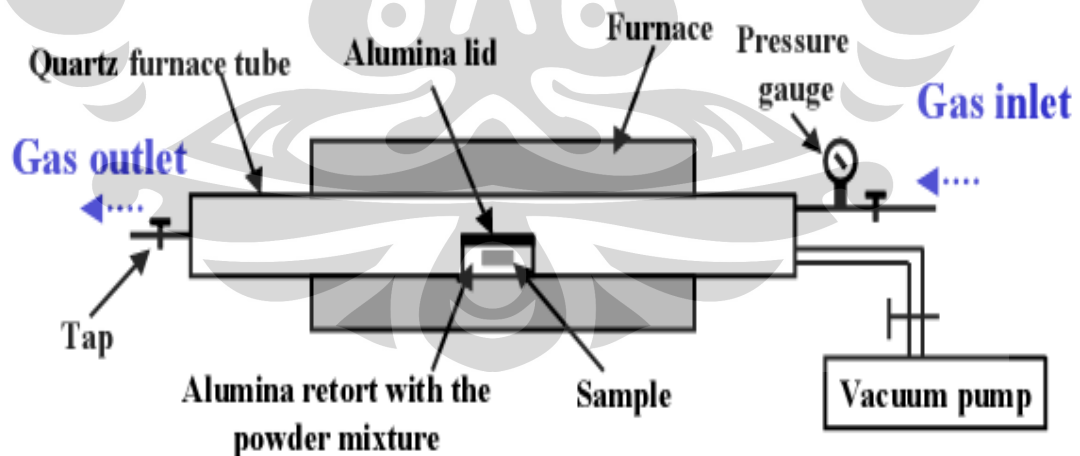
Proses Pack aluminizing

Secara garis besar proses *pack aluminizing* melibatkan beberapa tahap utama^[19], yaitu:

1. Pembersihan permukaan komponen yang akan *dicoating* dari pengotor seperti minyak, pasir atau produk korosi.
2. Menyiapkan material *pack* yang merupakan campuran serbuk (i) logam yang akan diendapkan (*master alloy*), misalnya serbuk Al, atau serbuk paduan Al-Cr, (ii) serbuk *activator* yaitu garam-garam halida seperti NH_4Cl , NH_4F , NaCl , NaF , yang akan bereaksi dengan serbuk logam membentuk halida logam, dan (iii) serbuk alumina (Al_2O_3) yang *inert* atau tidak turut bereaksi, berfungsi juga agar material *pack* tidak mengalami sintering. Komposisi dari masing-masing serbuk bervariasi dan menentukan komposisi akhir dan jenis *coating*
3. Mengubur komponen di dalam material *pack* di dalam suatu kontainer yang terbuat dari logam tahan temperatur tinggi atau keramik alumina.

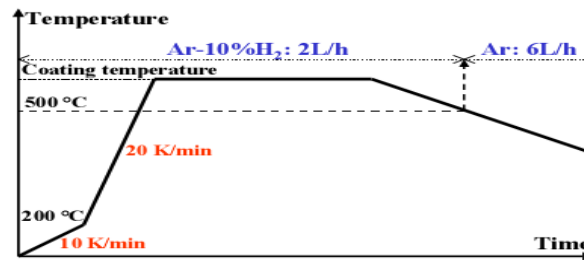
4. Memanaskan kontainer tersebut di dalam tanur pada temperatur antara 750-1100°C dengan lingkungan argon atau gas reduktif untuk waktu yang bervariasi (antara 2 s/d 24 jam). Hal ini akan menentukan jenis *coating* dan ketebalannya.
5. Mendinginkan di dalam tanur dan kemudian membongkarnya.

Coating yang akan terbentuk umumnya dibedakan menjadi 2, yaitu (i) *coating* yang tumbuh ke dalam substrat, atau sering disebut *high-activity aluminide coating* atau *inward diffusion coating*, dan (ii) *coating* yang tumbuh ke luar, atau sering disebut *low-activity aluminide coating* atau *outward diffusion coating*. Kedua jenis ini terutama tergantung dari aktivitas Al di dalam *pack*. Aktivitas Al di dalam *pack* akan tergantung dari komposisi dan jumlah *master alloy* di dalam *pack*, jenis dan jumlah *activator* di dalam *pack*, serta temperatur. Sebagai contoh pemakaian *master alloy* Al murni dan temperatur antara 750-900°C dapat menghasilkan *high-activity aluminide coating*, sedangkan penggunaan *master alloy* 5Al-95Cr dan temperatur 900-1100°C dapat menghasilkan *low-activity aluminide coating*^[19].



Gambar 2.13 Skema alat yang digunakan untuk *pack aluminizing*

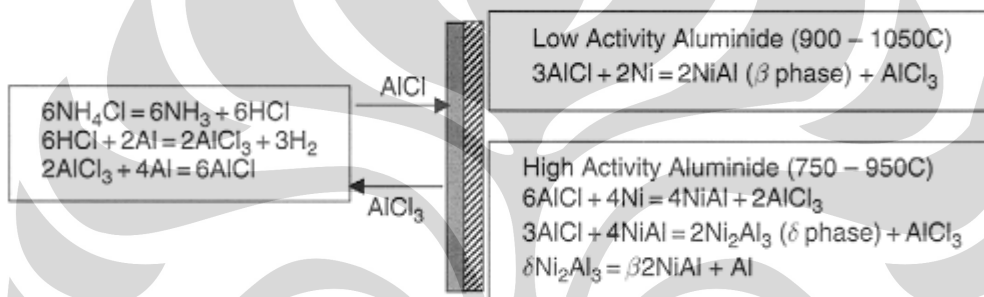
Sumber : Par M. Valentin Rohr^[14] telah diolah kembali



Gambar 2.14 Prosedur untuk pack aluminizing^[14]

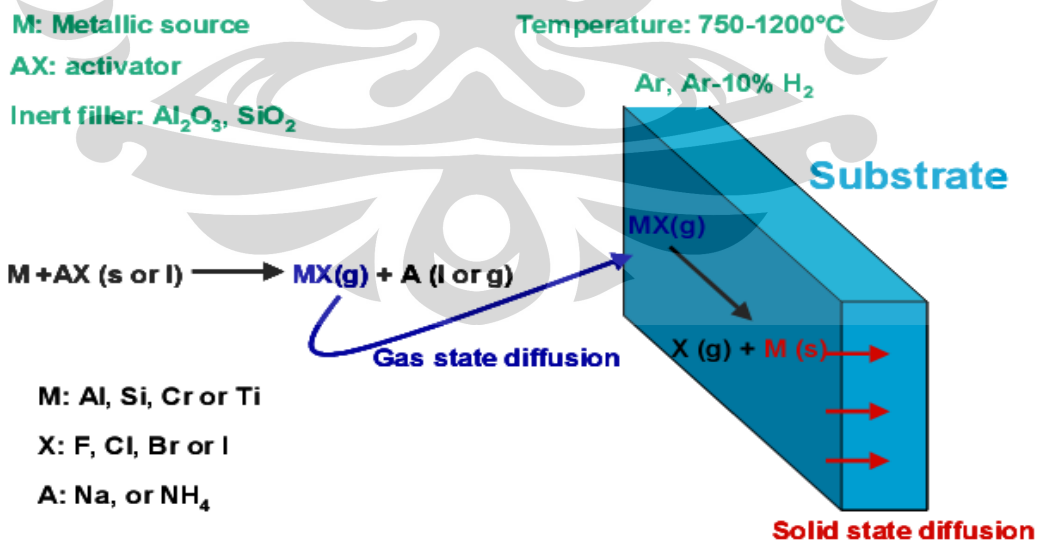
A. Aspek Termokimia

Reaksi yang terjadi di dalam pack bila *master alloy*-nya adalah Al murni dan *aktivator*-nya adalah NH_4Cl adalah sbb:



Gambar 2.15 Reaksi yang terjadi dengan pack activator

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali



Gambar 2.16 Skema reaksi yang terjadi pada pack cementation process.

Sumber : Par M.Valentin Rohr^[11] telah diolah kembali

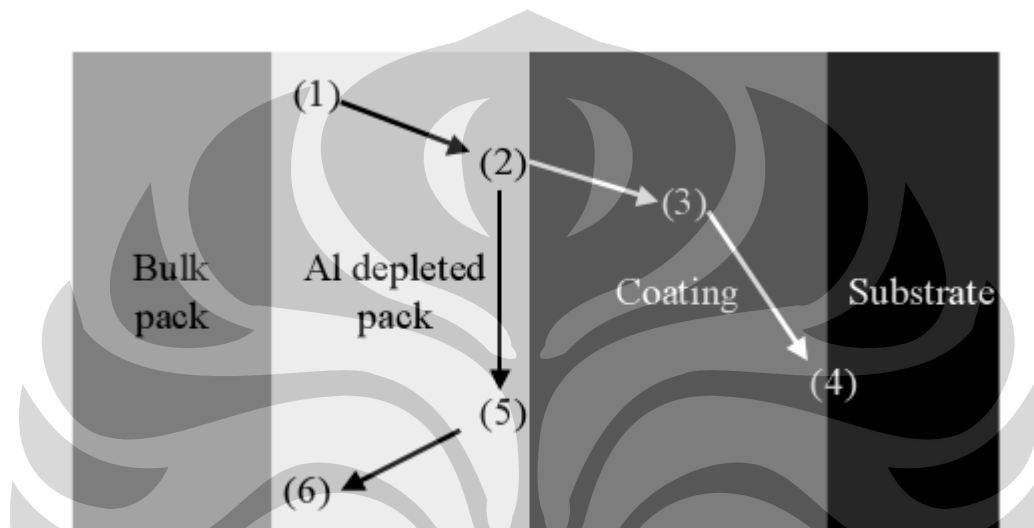
Reaksi-reaksi diatas pada prinsipnya merupakan pembentukan gas-gas halida Al. Tekanan parsial Al paling tinggi, dan arena aktivitas Al di pack lebih tinggi dibanding di permukaan substrat maka akan ada difusi gas AlCl ke permukaan substrat melalui celah atau pori diantara serbuk Al₂O₃. Terdifusi masuk ke dalam γ . Bila pada permukaan Al yang mengendap kemudian larut di dalam substrat γ (larutan pada Ni dalam struktur kristal FCC atau austenit). Dalam hal ini Al konsentrasinya mencapai konsentrasi kesetimbangan antara γ dan γ' (Ni₃Al) maka mulai terbentuk fasa intermetalik γ' ini. Selanjutnya Al berdifusi ke dalam dan Ni berdifusi keluar (interdifusi) melalui fasa γ' ini hingga pada permukaan konsentrasi Al meningkat mencapai konsentrasi kesetimbangan antara γ' dan β -NiAl maka fasa intermetalik β ini akan terbentuk. Dalam kaya Ni (Al 32-49% atom) difusivitas Ni lebih besar dibanding Al, sedangkan dalam β kaya Al (Al 50-57% atom) difusivitas Al lebih besar dibanding Ni. Besar kandungan Al di dalam β meningkat hingga konsentrasi kesetimbangan antara β dan δ (Ni₂Al) dicapai maka fasa δ ini akan terbentuk. Konsentrasi Al dalam fasa δ kira-kira 58-64% atom. Sebagai acuan dapat dilihat pada diagram fasa biner Ni-Al. Umumnya fasa δ (Ni₂Al₃) merupakan fasa terluar dari *high activity aluminide coating*, sedangkan dalam *low-activity aluminide coating* lapisan terluarnya adalah β kaya Ni (Al 32-49% atom). Namun demikian karena fasa lebih getas dibanding β -NiAl maka fasa β lebih diinginkan sebagai material dasar *coating*. Untuk mengubah δ menjadi β , maka dapat dilakukan perlakuan panas dengan cara memanaskan komponen yang telah *dicoating* pada T = 1000-1150°C selama 2-24 jam^[19].

B. Aspek Kinetika

Seperti semua proses CVD, *pack cementation* meliputi reaksi gas-padat. Gambar 2.17 sebagai ilustrasi untuk pembentukan lapisan *aluminide coating* dengan pertumbuhannya kearah luar, ketika keseimbangan dicapai oleh *pack*. Proses *coating* dapat dijelaskan dalam enam tahapan ^[20] :

1. Difusi fasa gas oleh molekul aluminium halida dari *pack* ke permukaan *coating* melalui Al *depleted zone* dari *pack*.

2. Pengendapan dari unsur *masteralloy* dari gas halida pada antarmuka *gas/coating*.
3. Difusi melalui zat padat dari aluminium melalui *coating* menuju antarmuka *coating/substrate*.
4. Pertumbuhan *coating* pada antarmuka *coating/substrate*.
5. *Desorption* oleh halogen dari antarmuka *gas/coating*.
6. Difusi fasa gas oleh halogen kembali kedalam *pack*.



Gambar 2.17 Skema pembentukan lapisan coating melalui proses pack cementation aluminising

Sumber : Metallurgical & materials transaction oleh Cockeram telah diolah kembali

Kinetika transport massa selama proses pada *aluminizing* dimodelkan pertama oleh Levine dan Caves. Dalam model ini selama proses pada *aluminizing* akan terbentuk daerah difusi (*diffusion zone*) didepan permukaan substrat yang menunjukkan gradient konsentrasi gas halida atau konsentrasi Al antara di *pack* dan di permukaan substrat. Lebar *diffusion zone* ini meningkat terhadap waktu, sehingga demikian pula kecepatan Al yang ditranspost dari *pack* ke permukaan substrat, memiliki hubungan secara parabolik sebagai berikut:

$$W_g^2 = k_g t \quad (2.5)$$

$$\text{Dimana: } k_g = \frac{2\rho\varepsilon MN_{Al}d}{lA} \quad (2.6)$$

W_g = jumlah Al yang diendapkan (g.cm^{-2})

- k_g = konstanta kecepatan ($\text{gr}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{dt}^{-1}$)
 ϵ = faktor koreksi untuk porositas *pack*.
 t = waktu reaksi (dt).
 l = faktor koreksi untuk panjang pori.
 M = berat atom Al.
 ρ = konsentrasi Al di dalam *pack* ($\text{gr} \cdot \text{cm}^3$).
 D = jarak difusi (cm)
 NA = kecepatan difusi Al dalam *pack* ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dt}^{-1}$).
 A = luas permukaan substrat (cm^2)

Di dalam *pack*, tekanan uap halida diambil yang berkesetimbangan dengan *pack*. Akan tetapi, tekanan uap halida dipermukaan *coating* lebih rendah dibanding dengan yang ada dalam *pack*, dan dianggap tetap terhadap waktu. Selain itu, reaksi antara gas halida dan *master alloy* dianggap sangat cepat sehingga selalu dalam kesetimbangan^[15].

C. Aspek Termodinamika

Dengan bantuan perhitungan termodinamika, aktivitas dari gas-gas halida dapat ditentukan dengan mempertimbangkan semua reaksi yang akan terjadi. Salah satu yang menjadi pertimbangan adalah mengoptimalkan konsentrasi *pack* dan kondisi proses yang dibutuhkan untuk membentuk fasa *coating* yang diinginkan.

1. Pemilihan logam yang akan diendapkan (*masteralloy*)

Aktifitas dari gas-gas halida tergantung pada kesulitan reaktan dalam membentuk halida dan juga tipe dari serbuk logam yang akan digunakan. Pemilihan *masteralloy* akan berpengaruh langsung terhadap peristiwa pengendapan apakah aktifitas prosesnya tinggi atau rendah. Agar mengurangi aktifitas *pack*, harus menggunakan serbuk logam yang murni, yangmana akan menghasilkan aktifitas yang maksimum, umumnya mengganti dengan paduan logam yang mengandung unsur yang diinginkan. Untuk contoh, Al-Cr atau Al-Ni adalah paduan yang biasa digunakan untuk menggantikan Al murni. Cr dan Ni disini bertindak sebagai *buffer* untuk menghasilkan tekanan halida yang rendah^[14].

2. Pemilihan *activator*

Activator akan menentukan reaksi dalam reaktan. *Activator* yang tidak stabil akan menghasilkan tekanan gas halida yang tinggi. Bila dibandingkan efisiensi dari *activator* NaCl, AlCl₃, NaF, AlF₃, Na₃AlF₆ dan dapat disimpulkan bahwa garam *fluoride* dapat menyebabkan tekanan gas halida yang tinggi bila dibandingkan garam *chloride* [26]. Selain itu tekanan gas dapat menurun, jika menggunakan garam *bromide* atau *iodide*. Bagaimanapun, dalam aplikasi yang sebenarnya seperti dalam proses pengendapan Cr-Al tidak bisa menggunakan *fluoride* karena tekanan gas yang dihasilkan tidak sebanding dengan tekanan Al dan Cr, oleh sebab itu lebih dipilih menggunakan *activator chloride*[14].

Berdasarkan pemilihan tersebut, maka kebanyakan peneliti merekomendasikan menggunakan garam amoniak, karena garam amoniak dapat terdekomposisi pada temperatur tinggi [22;23;24]. Sebenarnya gas NH₃ yang dihasilkan tidak stabil pada temperatur tinggi dan akan terdekomposisi pada temperatur diatas 350°C, sesuai dengan reaksi dibawah ini :



Keuntungan adanya reaksi tersebut adalah :

- Pembentukan hidrogen akan meningkatkan pengendapan dari unsur-unsur *coating* melalui reaksi reduksi.



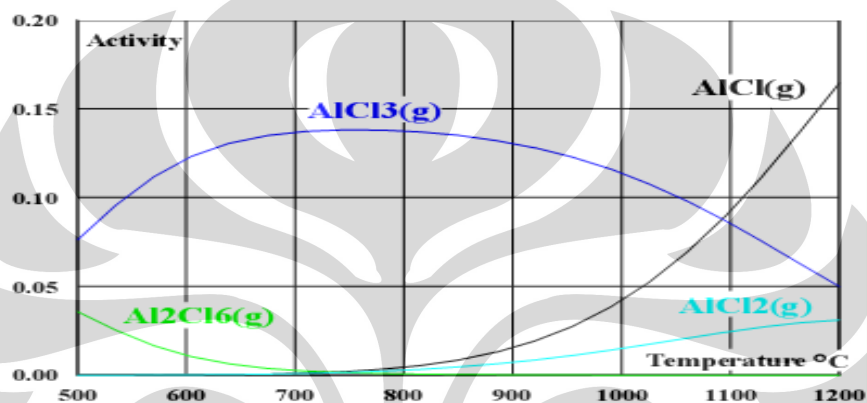
- Reaksi pengendapan *activator* tidak akan terjadi



3. Pemilihan temperatur proses

Semua reaksi yang terjadi dalam proses *pack cementation* tergantung terhadap temperatur. Oleh karena itu, temperatur proses akan mempengaruhi secara langsung pembentukan gas-gas halida dan endapan yang terjadi. Sebuah contoh, ditunjukkan pada gambar 2.17, Al *pack* menggunakan *activator* NH₄Cl. Perbedaan tekanan *chloride* tergantung pada temperatur

prosesnya. Terutama, adanya perubahan *chloride* yang dominan dari *trichloride* ke *monochloride* pada temperatur 1100°C, hal ini menunjukkan bahwa pengendapan Al akan lebih banyak terjadi diatas temperatur batasnya. dimana banyak reaksi $\text{AlCl}_{(g)}$ terjadi. Sebaliknya, Aktifitas $\text{AlCl}_{(g)}$ akan minimum jika temperaturnya dibawah 750°C, hal ini menunjukkan bahwa pengendapan sulit terjadi pada temperatur rendah. Selain itu karena jumlahnya sedikit, dekomposisi *chloride* lebih stabil ($\text{Al}_{3(g)}$ atau $\text{Al}_2\text{Cl}_{6(g)}$).



Gambar 2.18. Perhitungan aktifitas aluminium chloride yang dibentuk oleh 10 % Al, 1% NH_4Cl dan 89% Al_2O_3 .

Sumber : HSC Chemistry Version 4.1 (1999) [25] telah diolah kembali

D. Pembentukan Coating dan Strukturnya

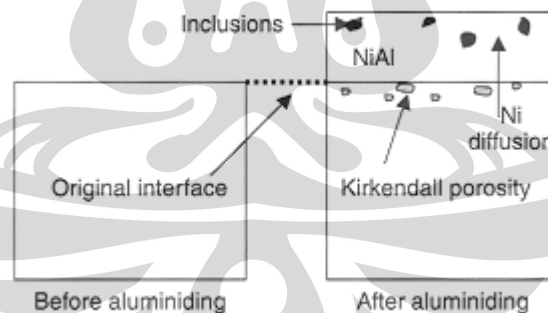
Ni-Al

1. *Low Activity, Outward Diffusion*

Ni murni : Jika aktifitas aluminium di dalam *pack* rendah dan temperatur *coating* sekitar 750-950°C, Ni akan lebih cenderung terdifusi ke luar melalui *coating* dan bergabung dengan Al untuk membentuk NiAl. Pertumbuhan *coating* kearah luar, karena pada hal ini difusi keluar dari Ni lebih cepat dibandingkan difusi kedalam dari Al. Pertumbuhan kearah luar ini kadang-kadang dapat menyebabkan material *pack* terjebak didalam *coating*. Partikel ini hanya ada didaerah dekat permukaan yang kontak langsung dengan *pack*[4].

Ni-Cr alloy : Reaksi yang terjadi pada material tergantung pada kandungan Cr. Untuk Ni10Cr (10% Cr), Ni berdifusi ke arah dalam membentuk NiAl, daerah yang dekat dengan permukaan akan kehilangan Ni, oleh karena itu daerah ini akan banyak mengandung Cr. Bagaimanapun Cr memiliki kelarutan yang terbatas. Sehingga tidak akan terjadi endapan Cr. Sebaliknya, untuk Ni20Cr situasinya akan berbeda, akan terjadi pengurangan Ni dari material dasar di daerah *interface* karena peningkatan konsentrasi Cr, di dekat daerah *interface* konsentrasi Cr melebihi batas kelarutan, sehingga hal ini akan menyebabkan terjadinya endapan α Cr di dekat daerah *interface*^[4].

Ni base superalloy : Pada pembahasan sebelumnya dalam *low activity process*, Ni akan lebih dominan berdifusi, yang mana akan berdifusi ke arah luar dan akan bergabung dengan aluminium untuk membentuk zona NiAl ($\text{Ni} + \text{Al} = \text{NiAl}$). Dekat dengan *interface*, zona internal, yang juga biasa disebut zona *interdiffusion*, dimana banyak kehilangan Ni. Untuk beberapa material NiAl dapat terbentuk di daerah lebih dalam tetapi memiliki tingkat kelarutan yang sedikit. *Low activity coating* tampak memiliki dua zona, keduanya adalah fasa β NiAl. Total ketebalan *coating* meliputi zona eksternal dan *interdiffusion*^[4].



Gambar 2.19 Pembentukan difusi aluminide pada Ni

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

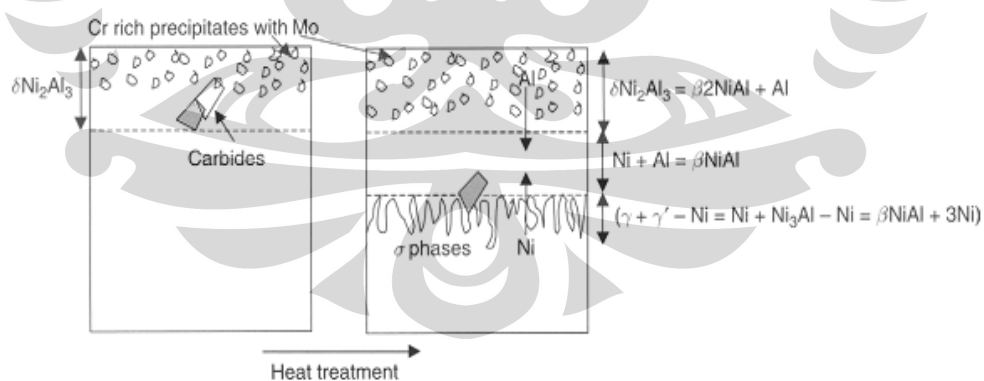
2. High Activity, Inward Diffusion

Ni base superalloy : Proses *coating* dengan aktifitas Al yang tinggi ditandai dengan difusi Al yang lebih dominan dibandingkan dengan difusi Ni. Oleh karena itu difusi Al akan mengarah ke dalam, sehingga permukaan yang sebenarnya dari

material tersebut akan berubah menjadi permukaan terluar dari *coating*. Mikrostruktur dan komposisi dari *coating* bergantung kepada aktifitas Al. Kemungkinan yang akan terbentuk adalah :

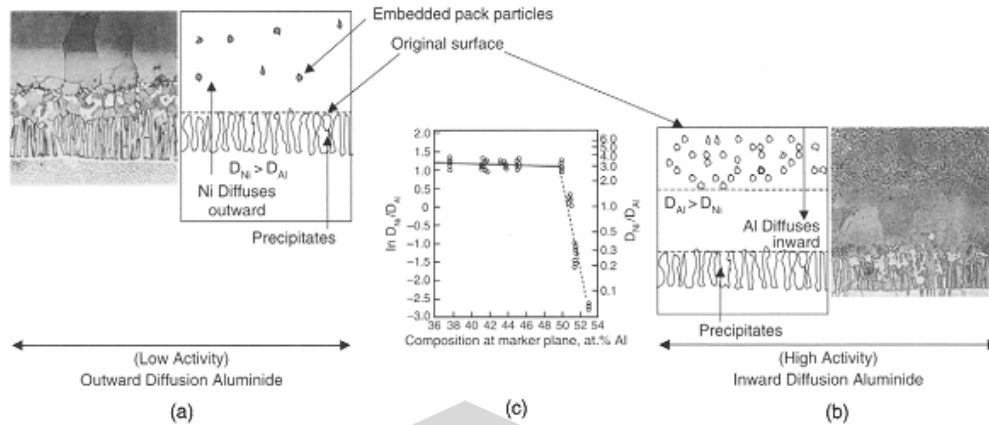
- Aktifitas Al yang sangat tinggi akan menghasilkan pembentukan dari fasa $\delta\text{Ni}_2\text{Al}_3$.
- Aktifitas Al tinggi akan menghasilkan fasa $\delta\text{Ni}_2\text{Al}_3$ dibagian luar bersebelahan dengan βNiAl dengan kandungan Al yang tinggi.
- Aktifitas Al sedang akan menghasilkan fasa βNiAl dengan kandungan Al yang tinggi.

Untuk membentuk *coating* yang dapat digunakan, pada kasus (a) dan (b) memerlukan tambahan perlakuan panas untuk mengubah fasa $\delta\text{Ni}_2\text{Al}_3$ yang getas agar lebih baik. Kaya kandungan Al “*hyper-stoichiometric*” (>50%) βNiAl , oleh karena itu Al akan lebih dominan berdifusi. Ni akan lebih dominan berdifusi pada kondisi “*hypostoichiometric*” (<50% Al). Pada *high-activity*, Al akan berdifusi kedalam sedangkan Ni akan berdifusi keluar ke zona *interdiffusion*. NiAl akan terbentuk dibagian tengah karena kombinasi dari Ni yang bergerak keluar dan Al yang akan bergerak kedalam^[4].



Gambar 2.20 Pembentukan struktur mikro pada high activity process

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

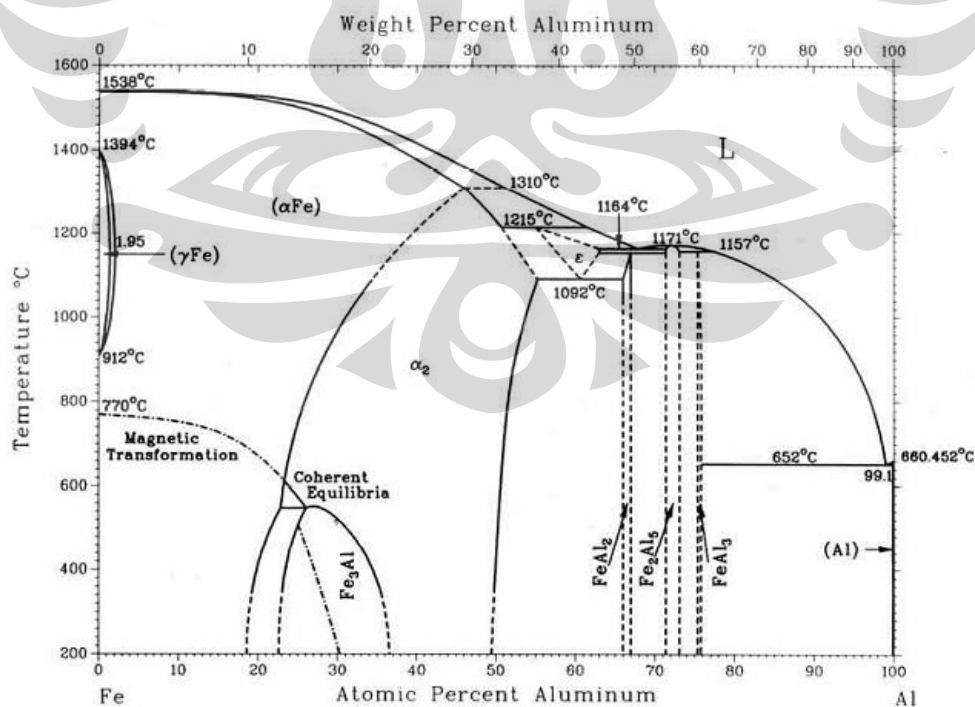


Gambar 2.21 Strukt mikro (a) low dan (b) high activity aluminde coating (c) laju difusi Ni dan Al sebagai fungsi dari komposisi NiAl

Sumber : High Temperatur Coatings oleh Sudhangshu Bose telah diolah kembali

Fe-Al

Aluminising pada Fe dapat terjadi sesuai dengan diagram fasanya. Dari diagram fasa tersebut dapat dilihat akan terbentuk beberapa fasa intermetalik, $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , $FeAl_2$, $FeAl$ atau Fe_3Al , semua ini sama baiknya dengan *solid solution* Al dalam Fe. Pembentukan yang efektif dari fasa-fasa ini dapat dikontrol dengan komposisi material *pack*, temperatur dan durasi selama proses. Parameter ini akan mengontrol fluk difusi, yangmana akan menentukan struktur akhir *coating*.

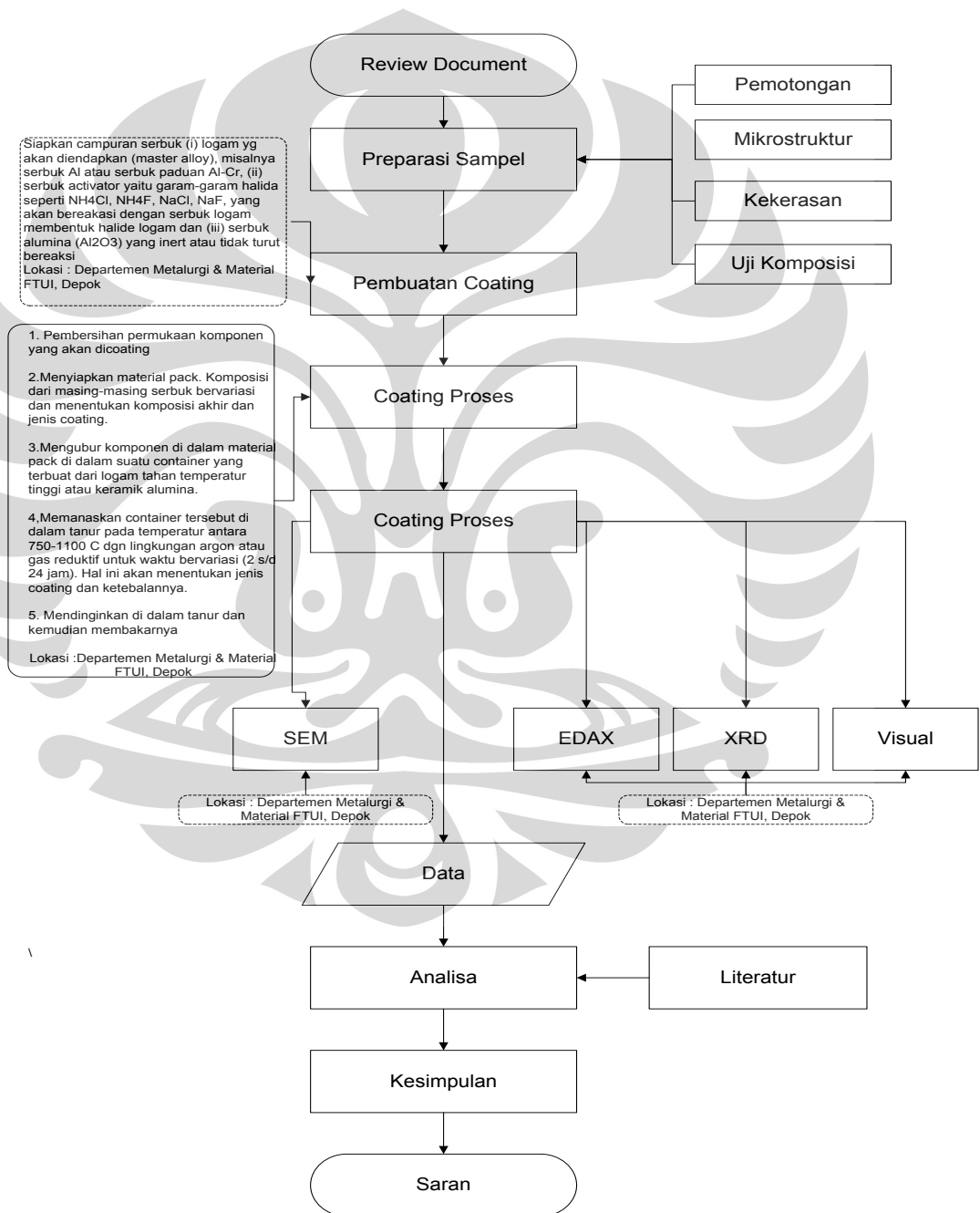


Gambar 2.22 Diagram fasa Fe-Al

BAB 3

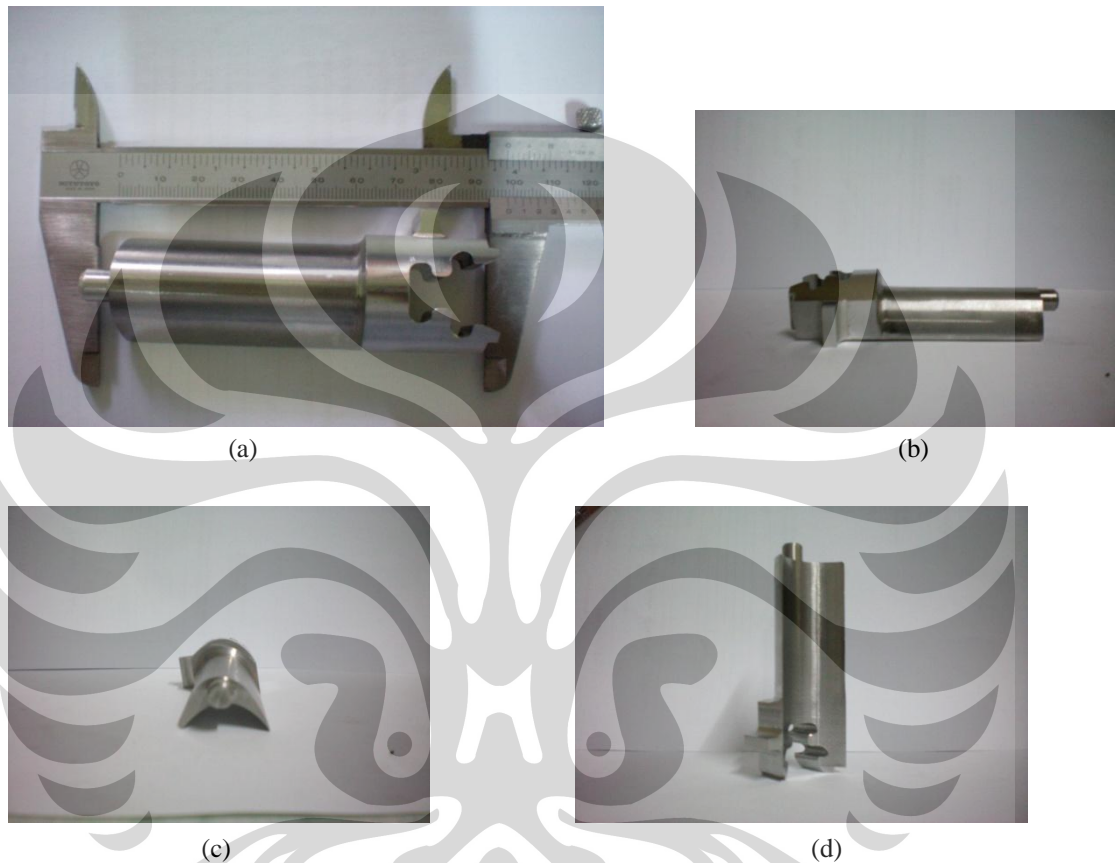
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian



3.2 Preparasi Sampel

Sampel yang akan digunakan berasal dari sudu turbin. Sudu turbin yang digunakan sebagai sampel biasa digunakan untuk turbin pembangkit listrik tenaga gas, yang bekerja pada temperatur tinggi. Material dari sudu turbin yang digunakan merupakan *stainless steel 410*.



Gambar 3.1 Sudu turbin dari material SS 410 (a) tampak atas (b) tampak samping (c) tampak depan (d) tampak bawah.

3.2.1 Pemotongan (*cutting*)

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah *stainless steel 410*. Material tersebut dipotong dengan ukuran $20 \times 10 \times 2$ mm dengan menggunakan gergaji ukuran 24, supaya hasil potongannya lebih halus. Setelah itu sampel diampelas dengan menggunakan kertas ampelas SiC dengan ukuran kertas ampelas 120#, 400# dan 1000#. Tujuan pengamplasan ini agar goresan-goresan sisa pemotongan dapat dihilangkan sehingga permukaan akan menjadi lebih halus.



Gambar 3.2 Hasil pemotongan sampel

3.2.2 Uji Kekerasan.

Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui ketahanan material terhadap deformasi plastis. Hal ini dilakukan untuk melihat kekerasan dari material sebelum dilakukan *coating*. Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk pengukuran kekerasan. Dalam penelitian kali ini menggunakan *microhardness*.

Proses Penjejukan :

- a. Sebelum melakukan pengujian, bersihkan permukaan indenter dan tempat dudukan sampel
- b. Letakkan sampel yang sudah dilakukan persiapan sebelumnya.
- c. Pilihlah beban yang sesuai dengan beban yang diuji.
- d. Beban yang digunakan untuk metode *Vickers* yaitu 50, 100, 300, 500 dan 1000 gf
- e. Pilih atau set ke posisi untuk melihat sampel.
- f. Lihat posisi yang akan dijejaki dengan menggunakan mikroskop
- g. Pilih atau set keposisi untuk penjejukan
- h. Lakukan penjejukan dengan menekan tombol start

Pengukuran Diameter Jejak :

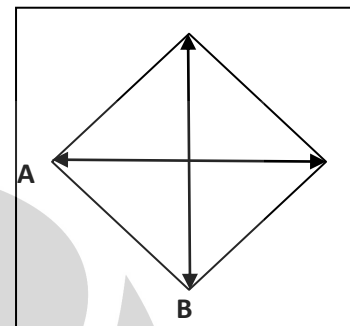
- a. Pilih atau set keposisi untuk melihat sampel

- b. Gerakkan garis skala tepat pada salah satu sudut belah ketupat pada metode *Vickers* dengan memutar tombol disebelah kanan untuk menghitung lebar secara horizontal (A)
- c. Gerakkan garis skala lain pada tombol didepan untuk menghitung lebar secara vertikal (B)
- d. Ukur panjang diameter hasil penjejakan (dp)

$$dp = \frac{A+B}{2} \quad (3.1)$$

- e. Masukkan nilai diameter dp ke dalam persamaan :

$$Hv = \frac{1854 \times \text{Beban}}{(dp^2)} \quad (3.2)$$



Gambar 3.3 Skema penjejakan

- f. Catat nilai kekerasan sampel pada lembar data pengujian



Gambar 3.4 Alat microhardness

3.2.3 Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk melihat kondisi awal dari struktur mikro sampel, sebelum dilakukan *coating* dan untuk melihat struktur mikro sebelum mengalami kegagalan.

3.2.4 Uji Komposisi Kimia

Uji komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan Spektrometer. Sampel uji spektrometer ditembak sebanyak 3 kali, kemudian diambil nilai rata-ratanya. Uji komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui kadar unsur-unsur yang terkandung dalam sampel, kemudian dibandingkan dengan standarnya.

3.3 Pembuatan *Coating*

Bahan-bahan yang diperlukan dalam proses pembuatan *coating*, yaitu :

1. Logam yang akan diendapkan (*master alloy*), seperti serbuk Al atau serbuk paduan Al-Cr.
2. Serbuk *activator* yaitu garam-garam halida seperti NH_4Cl , NH_4F , NaCl dan NaF , yang akan bereaksi dengan serbuk logam membentuk halida logam.
3. Serbuk alumina (Al_2O_3) yang *inert* atau tidak turut bereaksi. Komposisi dari masing-masing serbuk bervariasi dan menentukan komposisi akhir dan jenis *coating*.

Proses pembuatan :

1. Bahan-bahan yang telah disiapkan, dimasukkan kedalam suatu tempat/wadah yang terbuat dari material yang tahan terhadap temperatur tinggi.
2. Campurkan semua bahan-bahan tersebut hingga merata.
3. *Pack* sudah siap digunakan.



Gambar 3.5 Wadah yang digunakan untuk membuat *pack aluminide*

Tabel 3.1 Komposisi Material Pack

Material Pack	Komposisi	Komposisi			
		K2	K3	K5	K6
Al ₂ O ₃	wt %	92 %	90 %	90 %	88 %
	gram	23	22,5	22,5	22
NH ₄ Cl	wt %	2 %	2 %	4 %	4 %
	gram	0,5	0,5	1	1
Al	wt %	6 %	8 %	6 %	8 %
	gram	1,5	2	1,5	2

3.4 Proses *Coating*.

Setelah semua bahan *coating* selesai disiapkan maka proses selanjutnya adalah :

1. Pembersihan permukaan komponen yang akan *dicoating*.
2. Menyiapkan material *pack*. Komposisi dari masing-masing serbuk bervariasi dan akan menentukan komposisi akhir dan jenis *coating*.
3. Mengubur komponen di dalam material *pack* di dalam suatu kontainer yang terbuat dari logam tahan temperatur tinggi atau keramik alumina.
4. Memanaskan *container* tersebut di dalam tanur/oven pada temperatur antara 750°C-1100°C dengan lingkungan argon atau gas reduktif untuk waktu bervariasi (2 s/d 24 jam). Hal ini akan menentukan jenis *coating* dan ketebalannya.
5. Mendinginkan di dalam tanur dan kemudian membakarnya.



Gambar 3.6 Wadah yang sudah siap untuk dimasukkan kedalam oven

Pelaksanaan dapur Nabertherm :

- a. Tekan tombol 2 lalu masukan temperatur akhir yang diinginkan
- b. Tekan tombol Time 2 lalu masukan waktu tahan yang diinginkan
- c. Tekan tombol T 1 lalu masukan temperatur *preheating* yang diinginkan
- d. Tekan tombol Time 1 lalu masukan durasi waktu kenaikan temperatur hingga mencapai temperatur *preheating*
- e. Tekan tombol start

3.5 Preparasi Sampel

3.5.1 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro dan SEM

Untuk preparasi sampel pengamatan struktur mikro dan SEM dilakukan dengan berbagai tahap preparasi antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

1. Pemotongan (cutting)

Pemilihan sampel yang tepat dari suatu uji studi mikroskopik merupakan hal yang sangat penting. Pemilihan sampel didasarkan atas tujuan pengamatan yang akan dilakukan. Pengambilan sampel dari suatu bahan harus dilakukan secara

teliti, sehingga sampel yang diambil tersebut mewakili kondisi rata-rata bahan atau kondisi ditempat-tempat yang kritis. Sampel yang akan di-cutting adalah bagian atau daerah sampel yang dianggap *representative* dan mewakili semua sifat dari sampel. Pada penelitian kali ini, pemotongan sampel dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong band saw (untuk sampel dengan kekerasan sedang > 350 Brinell). Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses *cutting*. Hal ini dimaksudkan agar dapat mengurangi tingkat deformasi di permukaan sampel. Sampel pengamatan struktur mikro disini diambil dari benda yang telah di coating.

2. Mounting

Proses *mounting* bertujuan untuk menempatkan sampel pada suatu media, untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media. Dalam *compression mounting* diberikan tekanan dan panas untuk memperkeras resin. Pemilihan bahan mounting dan teknik mounting itu sendiri harus dipertimbangkan agar tidak merusak benda uji. Jika jumlah panas akan mengubah struktur mikro benda kerja maka mounting yang digunakan harus memiliki sifat eksoterm terendah. Faktor lain yang harus diperhatikan adalah ketahanan bahan mounting terhadap larutan dan zat pembersih yang akan digunakan.

Untuk sampel SEM, di-mounting dengan *castable resin* dengan ukuran cetakan yang lebih kecil. Karena jika menggunakan sampel dari mesin *compression mounting* terlalu besar ukurannya sehingga tidak masuk ke dalam *chamber* SEM.

3. Pengamplasan (*Grinding*)

Pengamplasan adalah tahapan penting dalam persiapan sampel metalografi. Proses pengamplasan ini bertujuan mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas dengan amplas nomor grid #120,

#400, #600, # 800, #1200, # 2500 dan # 4000 yang dilakukan secara bertahap dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus).

Pada pengamplasan diperlukan pendinginan, selain untuk menghindarkan efek pemanasan terhadap struktur mikro, tapi juga untuk mengalirkan geram logam yang terkikis, hal ini dilakukan dengan pemberian air. Air berfungsi sebagai pemindah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Hal ini yang harus diperhatikan adalah ketika melakukan perubahan arah pengamplasan, maka arah yang baru adalah 45° atau 90° terhadap arah sebelumnya, kemudian tekanan yang diberikan pada sampel harus dikontrol. Tekanan yang kecil tidak menimbulkan efek pengikisan, sedangkan penekanan yang terlalu besar akan menimbulkan goresan.

4. Pemolesan (*Polishing*)

Setelah sampel diamplas sampai halus (hingga grid 4000#), selanjutnya sampel dilakukan proses pemolesan dengan menggunakan serbuk alumina yang telah di campur air. Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkilap seperti cermin serta menghilangkan ketidakteraturan hingga orde $0.01 \mu\text{m}$. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel.

5. Etsa (*Etching*)

Etsa merupakan suatu proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat dengan jelas dan tajam. Untuk beberapa material, mikrostruktur baru muncul jika diberikan zat etsa. Sehingga perlu pengetahuan yang tepat untuk memilih zat etsa yang sesuai.

Etsa yang digunakan adalah Elektro Etching, dengan larutan yang digunakan adalah 15 gram asam oksalat kemudian ditambahkan aquades, arus yang digunakan sebesar 6-8 volt dengan waktu etsa selama 60-90 detik dalam keadaan suhu ruang

3.6 Pengujian Sampel

3.6.1 Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM dan EDS

Sebelum dimasukkan ke dalam chamber SEM, sampel di-coating terlebih dahulu menggunakan campuran Au-Pd. Coating ini bertujuan agar sampel dapat menghantarkan electron dengan baik, untuk mencegah terjadinya *charging* ketika elektron ditembakkan dan untuk menghasilkan kontras yang baik. Prinsip pengujian ini adalah dengan menggunakan elektron yang ditembakkan pada sampel. Hamburan electron dari hasil tumbukan dengan sampel akan ditangkap oleh detektor – detector pada SEM yang kemudian dapat menghasilkan gambar mikrostruktur pada layar. Selain itu juga pengujian dengan EDS juga akan mengetahui komposisi dari sampel yang telah *dicoating*



Gambar 3.7 Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6.2 Pengamatan dengan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk di permukaan sampel yang telah *dicoating*. Senyawa yang terlihat hanya yang ada dipermukaan, tidak bisa untuk melihat senyawa yang berada didalam. Mesin *X-Ray Diffraction* (XRD) yang digunakan menggunakan *tube anode Cu*



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Uji komposisi kimia dilakukan terhadap sampel yang akan dilakukan *coating*. Satu sampel uji komposisi kimia ditembak sebanyak tiga kali kemudian diambil nilai rata-ratanya, kemudian dibandingkan dengan literature

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Stainless Steel 410

Unsur	Hasil Pengujian (%)	Literatur (%)
C	0.058	0.15
Si	0.240	1
S	0.015	0.030
P	0.013	0.04
Mn	0.447	1
Ni	0.412	-
Cr	11.6	11.5-13.5
Mo	0.099	-
Ti	< 0.002	-
Cu	0.099	-
Nb	0.007	-
V	0.078	-
Al	0.001	-
Fe	86.8	Balance

Material ini merupakan martensitik *stainless steel*, martensitik *stainless steel* memiliki kekerasan yang sangat tinggi yang disebabkan paduan-paduan yang terdapat didalamnya. Kekerasan yang dihasilkan sangat dipengaruhi kandungan karbonnya. Ketika material ini dipanaskan pada temperatur tinggi dan dikuens, maka material ini akan membentuk fasa martensit yang sangat keras. Kandungan

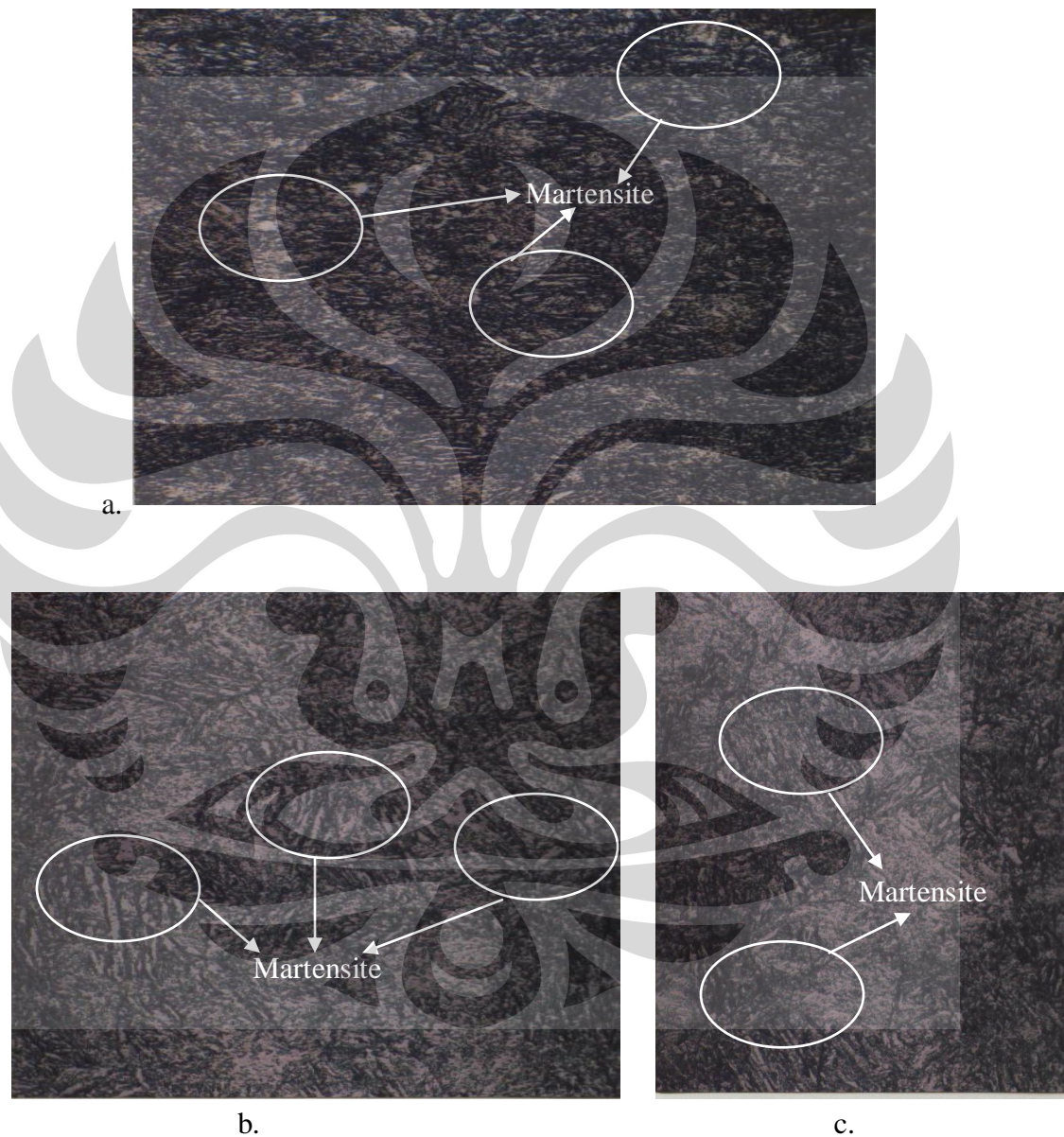
karbon bervariasi dari 0.15 % sampai 1.2 % tergantung dari paduannya. Bila dilakukan anil pada material ini dapat meningkatkan karbon yang berdifusi. *Machinability* menurun jika kandungan karbon meningkat. Melakukan anil pada material AISI 410 ini akan mempermudah dalam proses permesinan, *machinability* dari martensitik *stainless steel* berada diantara feritik (mudah) dan austenitic (lebih sulit). Berdasarkan pengujian kekerasan yang telah dilakukan kekerasan material ini adalah 23 HRC. Oleh karena itu proses permesinannya mudah maka material ini diaplikasikan untuk membuat sudu turbin, *valve* dan *fittings*. Material ini memiliki ketahanan korosi yang cukup baik karena terdapat Cr.

Aplikasi dari material ini adalah lingkungan temperatur tinggi, kondisi pada temperatur tinggi ini dapat menyebabkan terjadinya oksidasi pada material yang dapat berakibat kegagalan dalam aplikasinya. Oleh karena itu untuk mencegah terjadi oksidasi ini diperlukan paduan-paduan yang dapat melindungi material ini, seperti aluminium, aluminium sangat jelas pengaruhnya yaitu dapat membentuk lapisan Al_2O_3 yang tahan terhadap korosi, tetapi dari hasil pengujian spektrometer didapatkan unsur aluminium sekitar 0.001 %, sehingga hal ini tidak akan memiliki pengaruh terhadap ketahanan oksidasi dari material tersebut, selain aluminium unsur seperti Mn juga sangat diperlukan untuk mendukung terbentuknya kerak Al_2O_3 , dari hasil pengujian spektrometer didapatkan unsur Mn ini sekitar 0.447 %.

Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa dengan komposisi tersebut bila material ini diaplikasikan pada temperatur tinggi maka usia pemakainya tidak dapat berlangsung lama karena kemungkinan dapat terserang korosi temperatur tinggi

4.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan mikro struktur dilakukan untuk melihat struktur awal material sebelum dilakukan *coating*. Pada material martensitik *stainless steel*, terdapat fasa martensit yang tersebar merata. Dari pengamatan struktur mikro, fasa martensit ini bersifat sangat keras.



Gambar 4.1 Struktur mikro martensitik stainless steel (a) perbesaran 200x (b dan c) perbesaran 500x

Dari gambar diatas sangat jelas sekali bahwa fasa martensit tersebar merata di dalam struktur material tersebut kemudian ditambah dengan adanya unsur Cr

yang cukup tinggi sehingga dapat menstabilkan fasa ini. Jadi, dengan adanya pengamatan mikro struktur ini dapat mempertegas jenis *stainless steel* yang digunakan.

4.3 Pengamatan Visual

Pengamatan visual disini untuk melihat keadaan *coating* secara keseluruhan tanpa menggunakan alat apapun. Gambarnya dapat dilihat dibawah ini



Gambar 4.2 Tampilan fisik hasil coating dengan komposisi 6% Al-2% NH₄Cl-92% Al₂O₃ dengan waktu proses 3 jam



Gambar 4.3 Tampilan fisik hasil coating dengan komposisi 6% Al-2% NH₄Cl-92% Al₂O₃ dengan waktu proses 6 jam



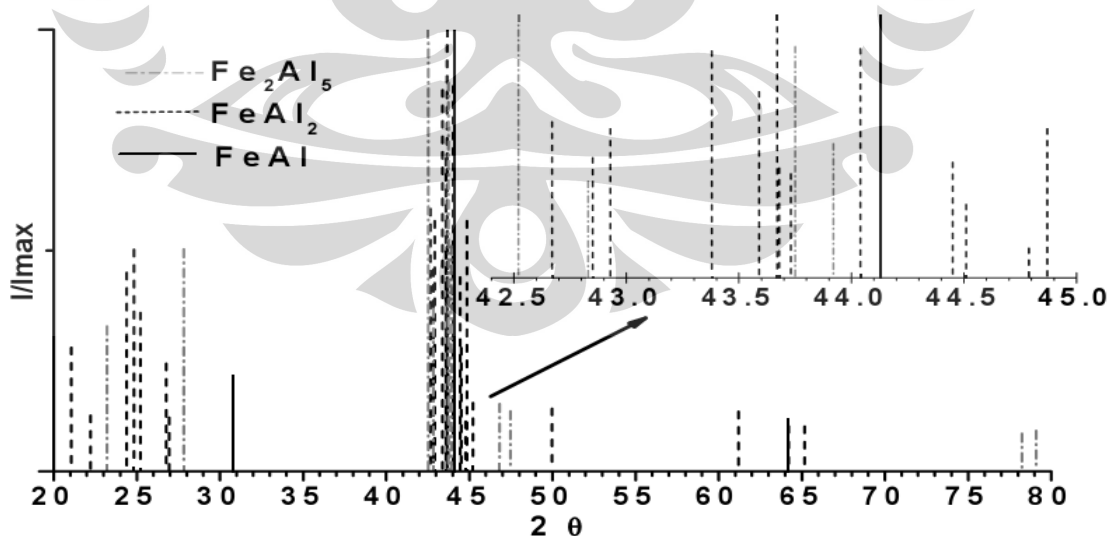
Gambar 4.4 Tampilan fisik hasil coating dengan komposisi 6% Al-2% NH₄Cl-92% Al₂O₃ dengan waktu proses 24 jam

Berdasarkan hasil pengamatan visual yang telah dilakukan terhadap waktu proses yang berbeda, dapat diketahui bahwa pada waktu proses 3 jam (Gambar 4.2) *coating* yang terbentuk di permukaan material tidak rata dan sangat tipis, sehingga walaupun sudah *dicoating* masih dapat terlihat warna dasar dari material tersebut. Pada waktu proses 6 jam (Gambar 4.3) terlihat terjadi perubahan warna pada permukaan sampel, warna dari permukaan sampel terlihat lebih gelap bila dibandingkan dengan waktu proses 3 jam, secara visual *coating* yang terbentuk mulai rata keseluruh permukaan material. Sedangkan pada waktu proses 24 jam (Gambar 4.4) warna pada permukaan material terlihat lebih gelap lagi bila dibandingkan dengan waktu proses 6 jam dan hal ini merata hampir keseluruhan permukaan material.

Pada variabel serbuk Al tampilan fisik hasil proses *pack aluminizing* hampir sama dengan variabel waktu tahan, terjadi perubahan warna pada permukaan material setiap perubahan kandungan Al pada material *pack*.

4.4 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

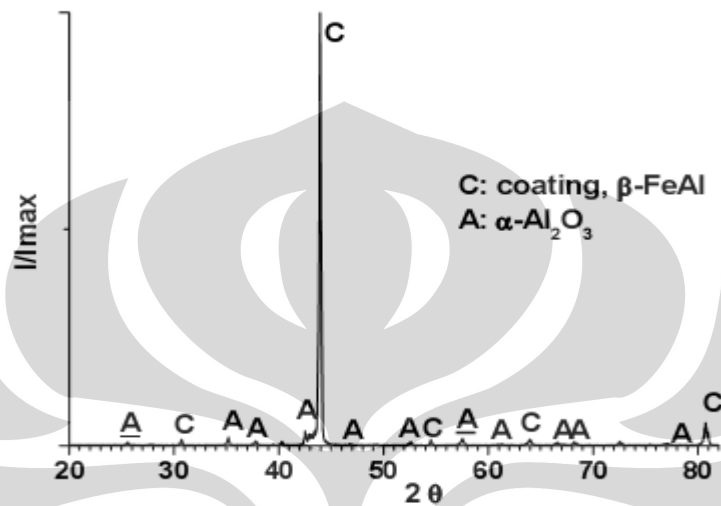
Alat XRD yang digunakan pada pengujian kali ini menggunakan radiasi Cu $K\alpha$. Dibawah ini akan ditunjukkan pola diagram XRD posisi peak untuk intermetalik Fe-Al:



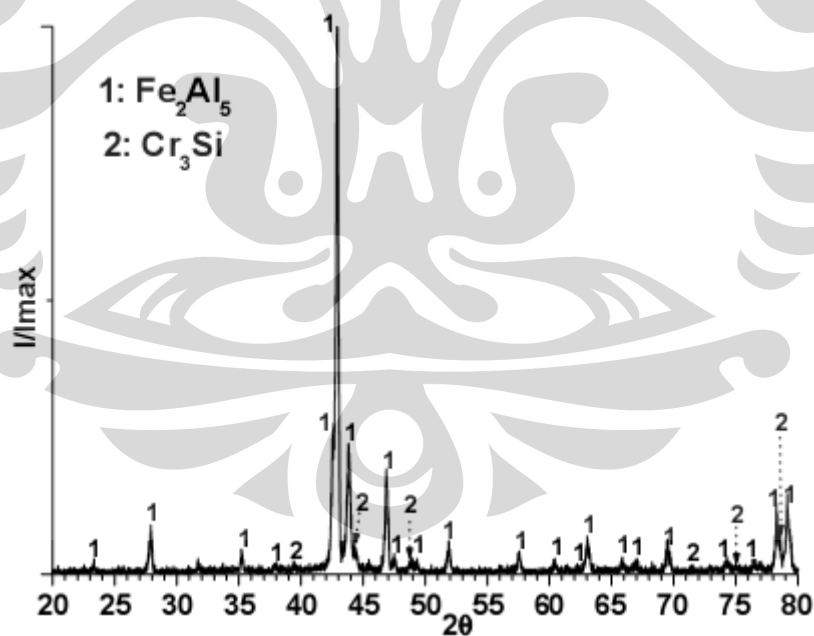
Gambar 4.5 Diagram XRD untuk melihat senyawa intermetalik Fe-Al. Untuk pengamatan yang lebih baik peak <0.1 tidak diperhitungkan.

Sumber : Par M.Valentin Rohr^[11] telah diolah kembali

Posisi *peak* utama untuk Fe_2Al_5 pada 42.5° dan 27.8° , selain itu juga sekitar 47° dan 79° . Untuk FeAl_2 , *peak* utamanya sekitar 25° , tetapi *peak* 50° dan 61° juga dapat dikategorikan senyawa tersebut. Bahkan, *peak* utama untuk FeAl pada 44.1° , susah untuk dibedakan dengan fasa-fasa yang lain, maka karakteristik *peak* pada 30.8° juga dapat digunakan untuk menentukan fasa FeAl .

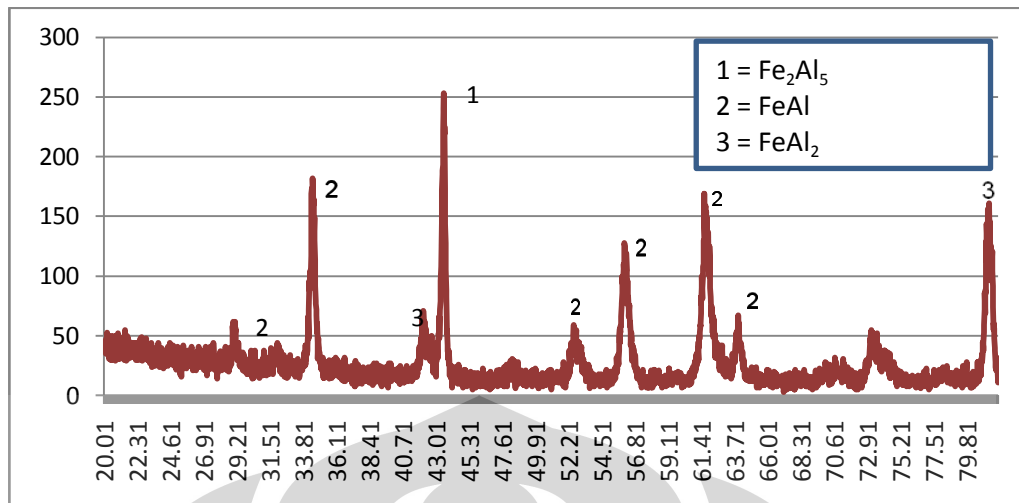


Gambar 4.6 Pola diagram XRD literatur terbentuknya lapisan $\beta\text{-FeAl}$ ^[11]



Gambar 4.7 Pola diagram XRD literatur terbentuknya lapisan Fe_2Al_5 dan Cr_3Si

Sumber : Par M.Valentin Rohr^[11] telah diolah kembali



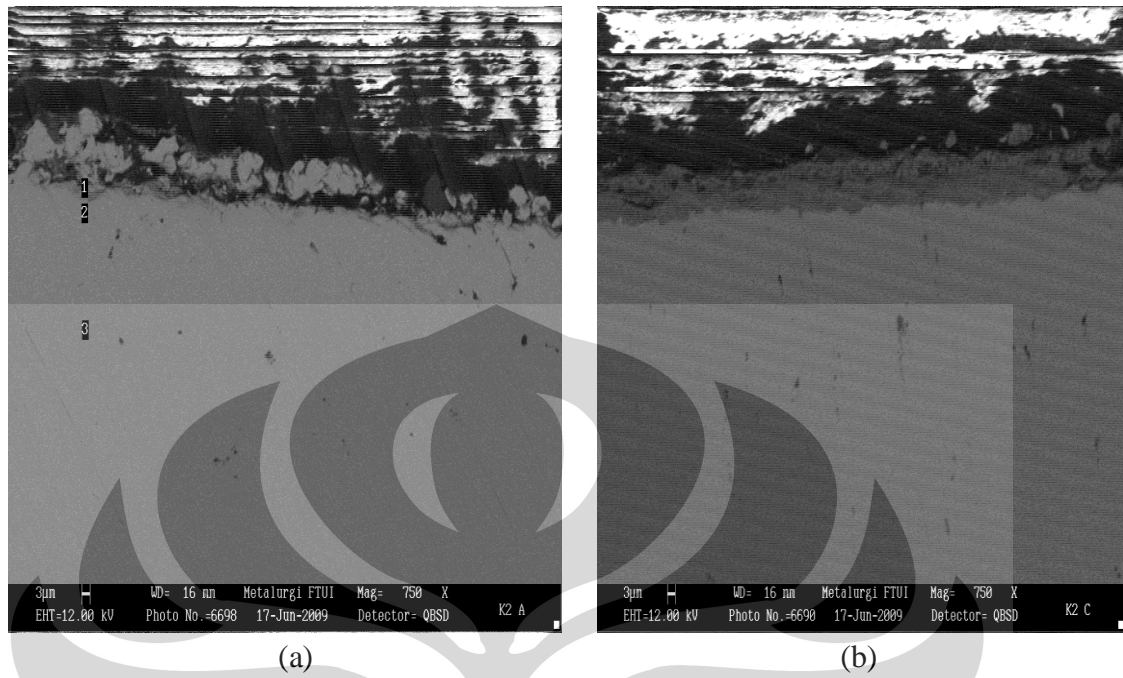
Gambar 4.8 Hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Berdasarkan hasil pengujian XRD yang telah didapat dapat diketahui terbentuknya beberapa senyawa Fe-Al dipermukaan material, karena *peak* yang dihasilkan hampir serupa dengan *peak* fasa-fasa intermetalik yang terdapat pada literatur. *Peak* utama dari hasil percobaan berada pada 43.5° , 34.4° dan 61.6° . Senyawa-senyawa yang terdapat di permukaan material adalah Fe_2Al_5 , FeAl_2 dan FeAl . Seperti telah diketahui bahwa fasa intermetalik memiliki sifat mekanis yang sangat luar biasa pada temperatur tinggi, fasa intermetalik memiliki ketahanan terhadap oksidasi, walaupun pada temperatur ruang bersifat getas tetapi seiring dengan bertambahnya temperatur tingkat keuletannya bertambah. Hal ini yang sangat dibutuhkan oleh material yang diaplikasikan pada temperatur tinggi.

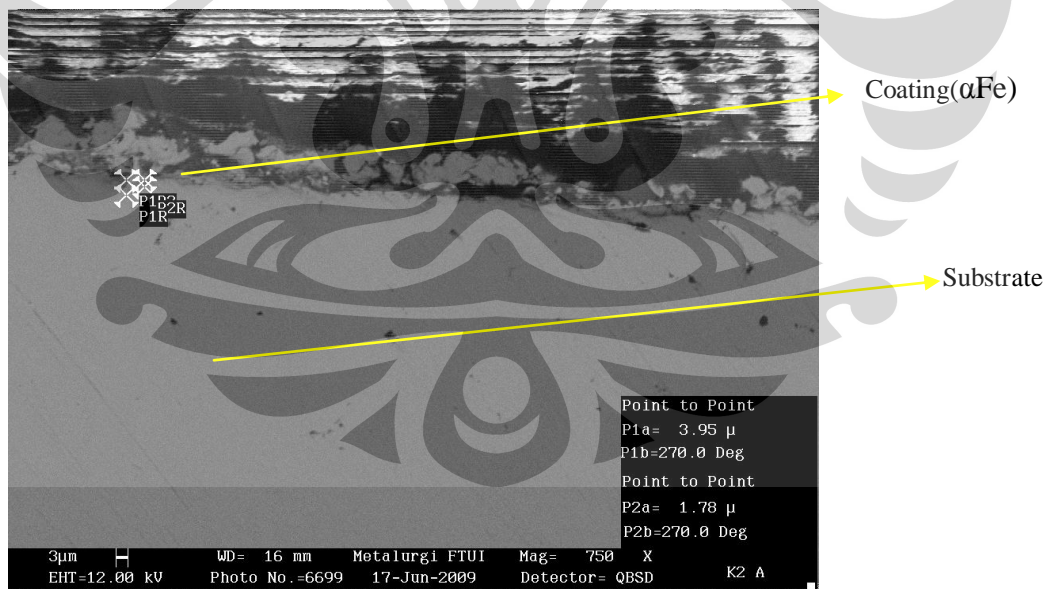
4.5 Pengaruh Waktu Proses Terhadap Pembentukan Lapisan Fe-Al

Pada Tabel 4.2 terlihat beberapa variasi yang digunakan sebagai material *pack*. Untuk menyelidiki pengaruh dari waktu proses terhadap pembentukan lapisan *coating* maka temperatur akan dijaga konstan yaitu 850°C dan komposisi yang digunakan ada 4 komposisi yang dapat dilihat pada Tabel 3.1. Sedangkan untuk waktu proses yang digunakan 3 dan 6 jam. Dibawah ini adalah foto hasil pengamatan SEM :

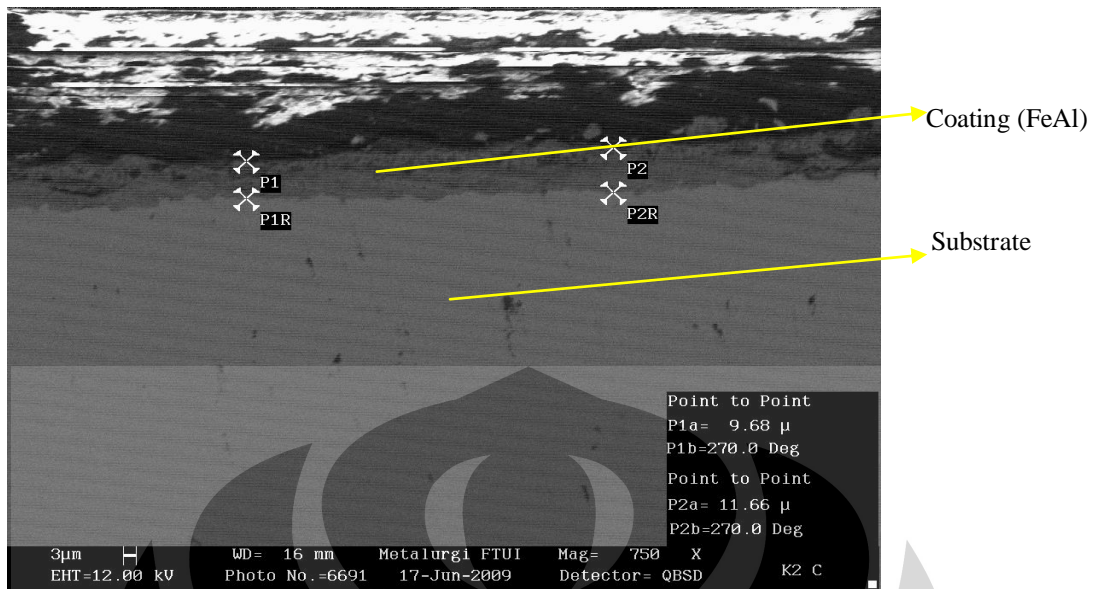
Komposisi : 6% Al- 2% NH_4Cl - 92% Al_2O_3



Gambar 4.9 Perbedaan ketebalan coating berdasarkan waktu proses (a) 3 jam (b) 6 jam

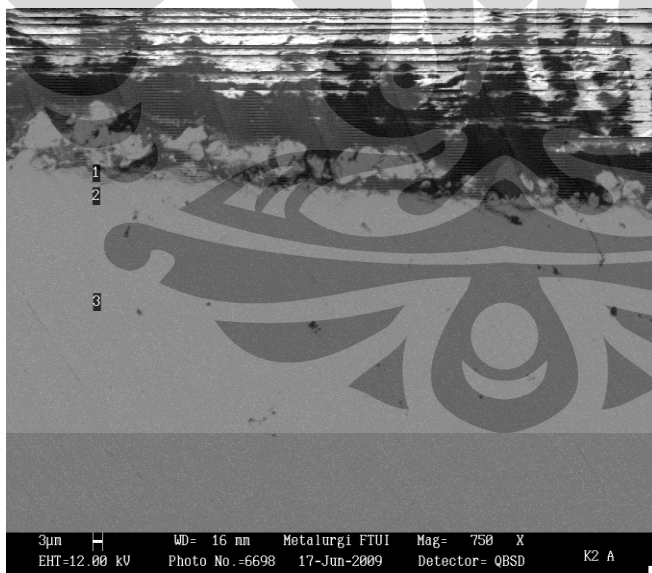


(a)



(b)

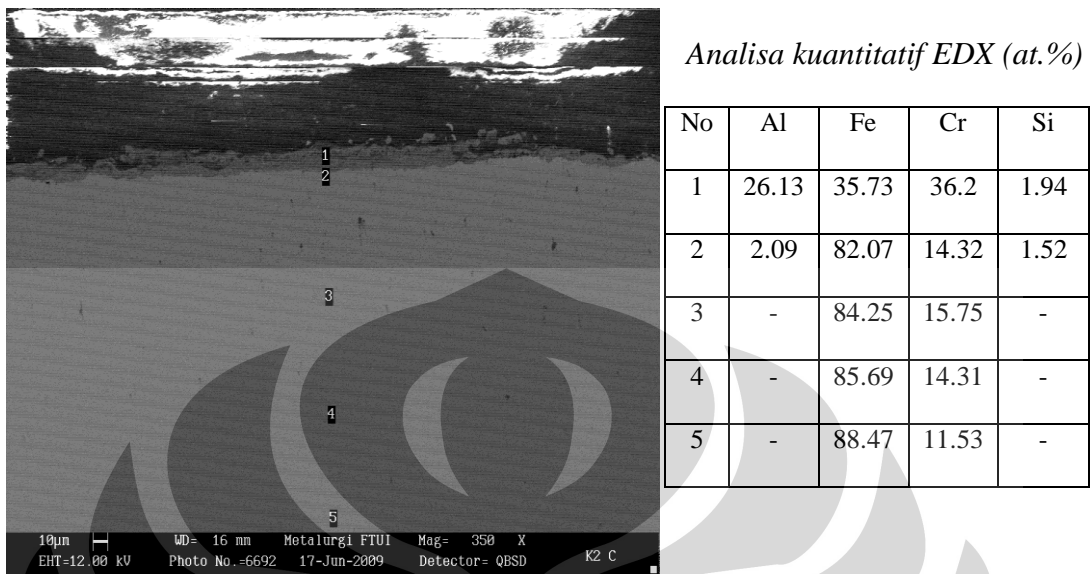
Gambar 4.10 Ukuran ketebalan coating (a) waktu proses 3 jam (b) 6 jam



Analisa kuantitatif EDX (at.%)

No	Al	Fe	Cr	Si
1	1.75	92.57	6.73	-
2	-	91.05	8.95	-
3	-	85.05	13.74	1.21

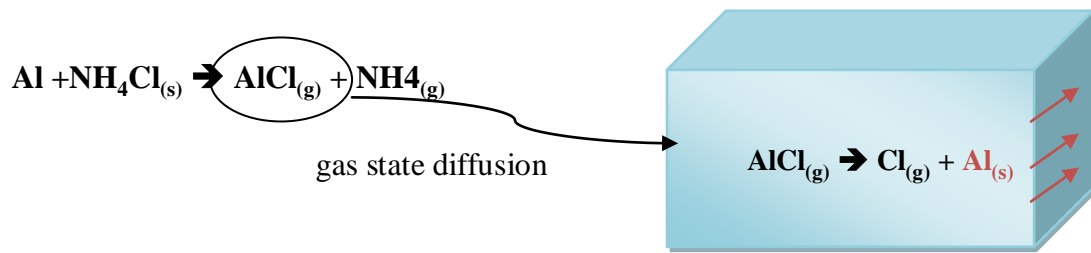
Gambar 4.11 Hasil pengujian EDX dan foto SEM, Kondisi percobaan : waktu proses 3 jam



Gambar 4.12 Hasil pengujian EDX dan foto SEM, Kondisi percobaan : waktu proses 6 jam

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, didapatkan foto seperti Gambar 4.9, disana terlihat terdapat perbedaan yang sangat mendasar yaitu pada lapisan yang terbentuk di permukaan. Pada Gambar 4.9 (a) dengan waktu proses 3 jam lapisan yang terbentuk lebih tipis bila dibandingkan dengan lapisan yang terbentuk pada Gambar 4.9 (b) dengan waktu proses 6 jam. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.10 (a) ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk berkisar pada 3,95 μm untuk daerah yang paling tebal dan 1,78 μm untuk daerah yang tipis. Sedangkan pada Gambar 4.10 (b) ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk berkisar pada 11,66 μm untuk daerah yang paling tebal dan 9,68 μm untuk daerah yang tipis.

Hasil yang telah didapat menunjukkan bahwa dengan bertambahnya waktu proses maka akan meningkatkan ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk. Hal ini dikarenakan semakin lama proses yang dilakukan maka reaksi yang terjadi antara Al (*masteralloy*) dengan uap-uap halida akan semakin banyak, sehingga akan menghasilkan reaksi sebagai berikut :



Gambar 4.13 Skema pembentukan lapisan intermetalik

Kinetika transport massa selama proses *pack aluminizing* dimodelkan pertama kali oleh Levine dan Caves^[18]. Dalam model ini selama proses *pack aluminizing* akan terbentuk daerah difusi (*diffusion zone*) didepan permukaan substrate yang menunjukkan gradient konsentrasi gas halida atau konsentrasi Al antara di *pack* dan di permukaan substrate. Lebar daerah difusi ini akan meningkat terhadap waktu, sehingga demikian pula kecepatan Al yang ditransport dari *pack* ke permukaan substrate. Selain itu, dapat diketahui juga bila aktifitas uap halida terlalu rendah maka dibutuhkan waktu proses yang lebih lama untuk melakukan proses difusi. Pada waktu proses 3 jam lapisan *coating* yang dihasilkan sangat tipis bila dibandingkan dengan waktu proses 6 jam. Aktifitas *pack* disini terlalu rendah (*low activity*) sehingga pada waktu proses 3 jam proses difusi belum terjadi secara merata dan hal ini dibuktikan dengan pengamatan visual dimana terlihat perbedaan warna dan terlihat tipis dan pada pengamatan SEM juga terlihat lapisan yang tipis. Pada waktu proses 6 jam difusi Al mulai terjadi secara merata diseluruh permukaan material dan hal ini dapat dibuktikan dengan hasil pengamatan foto SEM dimana terbentuk lapisan *coating* yang lebih tebal dibandingkan dengan yang waktu proses 3 jam, dari hasil pengamatan visual juga terlihat perubahan warna yang merata diseluruh permukaan material.

Dari hasil pengujian EDX yang telah dilakukan pada kondisi waktu proses 3 jam, dapat dilihat pada Gambar 4.11. Disana terlihat kandungan aluminium yang terdifusi sangat kecil sekali sebesar 1,75 at.% bila dibandingkan dengan kandungan Fe dan Cr. Kemudian dilakukan penembakan EDX pada titik dibawah lapisan *coating* tersebut dan hasilnya tidak ada lagi kandungan aluminium,

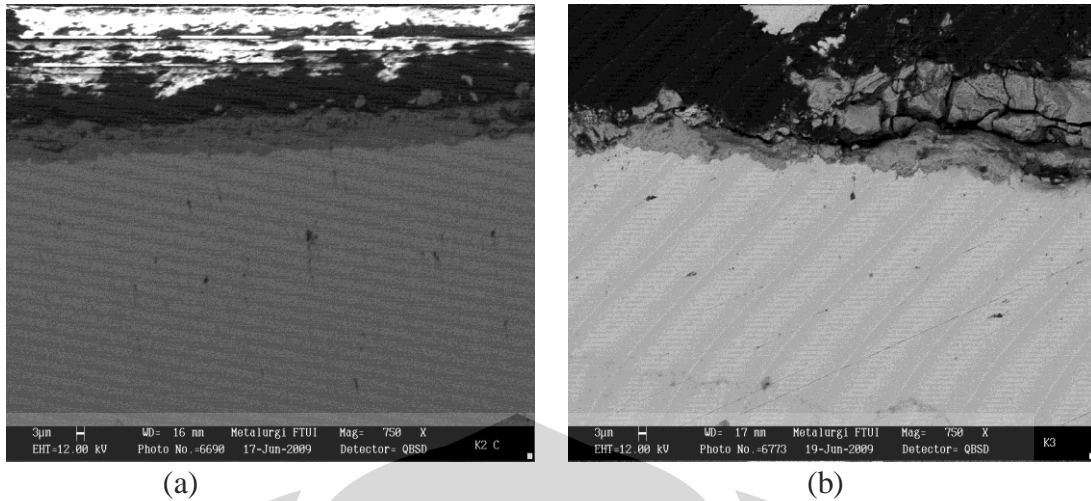
kandungan Cr semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Pada gambar 4.12 hasil pengujian EDX pada kondisi waktu proses 6 jam, dilakukan penembakan sebanyak 5 kali. Dari tabel tersebut dapat dilihat pada daerah lapisan *coating* terdapat kandungan alumunium yang cukup besar sekitar 26,13 at.%, selain adanya alumunium juga terdapat unsur Fe, Cr dan Si. Kemudian didaerah yang lebih dalam lagi kandungan alumunium ini semakin berkurang hingga akhirnya tidak ada lagi kandungan alumunium didalam substrate.

Pada hasil EDX kondisi waktu proses 3 jam, diketahui bahwa kandungan alumunium akan berkurang dengan meningkatnya kedalaman. Karena diagram fasa Fe-Al menunjukkan bahwa kelarutan alumunium dalam Fe sampai dengan 40 % atom, maka sangat jelas bahwa *coating* yang terbentuk terdiri dari larutan padat (*solid solution*) Fe-Al. *Coating* yang terdiri dari larutan padat (*solid solution*) tahan terhadap temperatur tinggi.

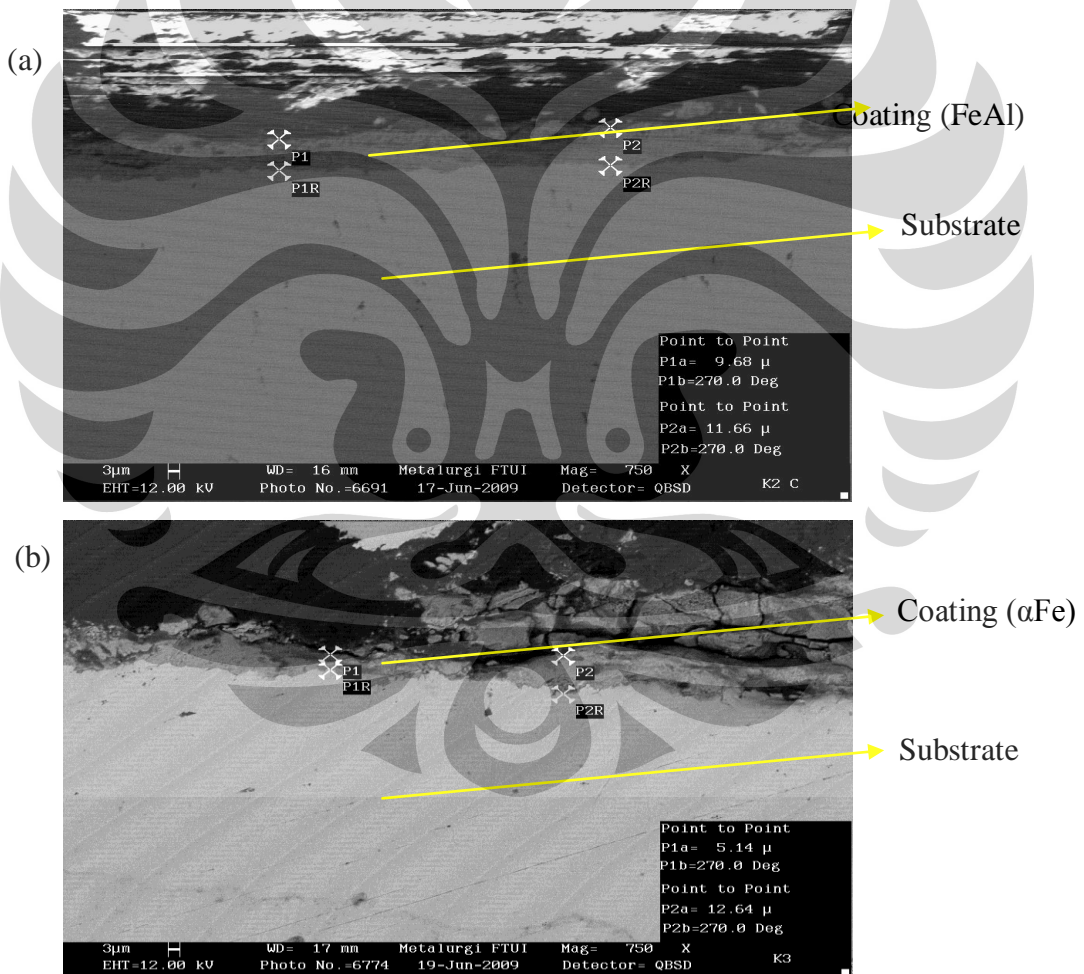
Pada hasil EDX kondisi waktu proses 6 jam, kandungan alumunium dipermukaan akan berkurang dengan meningkatnya kedalaman. Dari perbandingan persen atom Fe dan Al, dapat diketahui dari diagram fasa Fe-Al bahwa *coating* yang terbentuk dipermukaan adalah fasa intermetalik Fe-Al

4.6 Pengaruh Kandungan Alumunium Dalam Material Pack Terhadap Pembentukan Lapisan Fe-Al

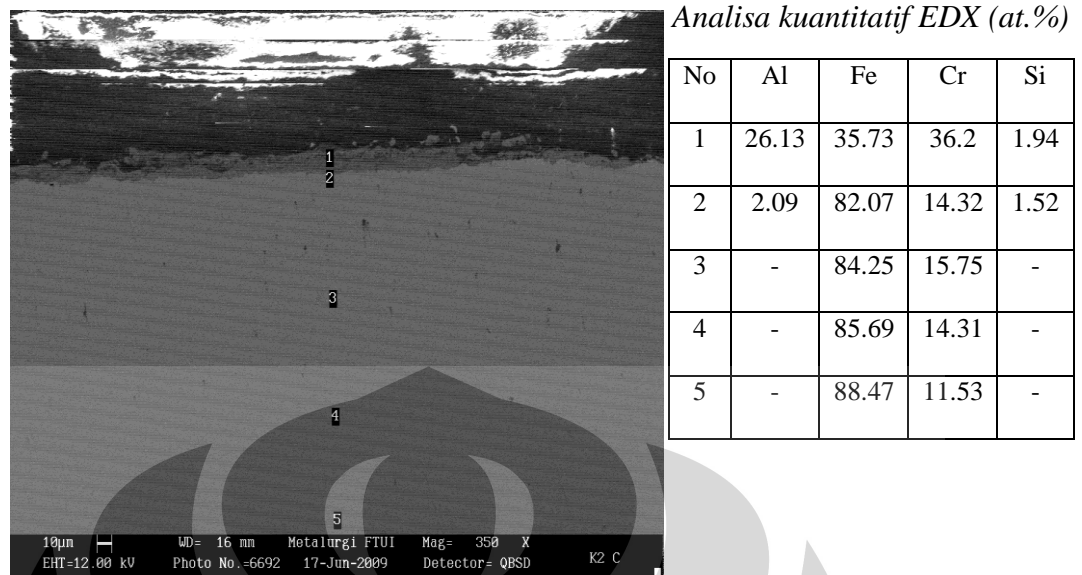
Pada Tabel 4.2 terlihat beberapa variasi yang digunakan sebagai material *pack*. Untuk menyelidiki pengaruh dari kandungan alumunium dari material *pack* terhadap pembentukan lapisan *coating* maka temperatur, serbuk *activator* , dan waktu proses akan dijaga konstan yaitu 850 °C, serbuk *activator* 2% NH₄Cl dan waktu proses yang digunakan adalah 6 jam. Dibawah ini adalah foto hasil pengamatan SEM :



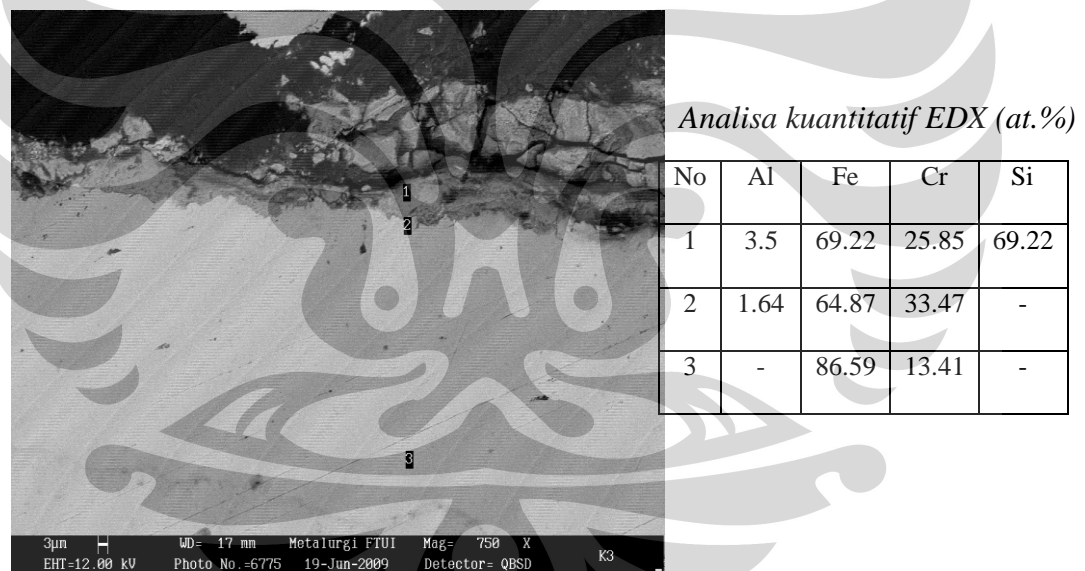
Gambar 4.14 Perbedaan ketebalan coating berdasarkan kandungan Al dalam material pack
 (a) 6% Al- 2% NH₄Cl- 92% Al₂O₃ (b) 8% Al- 2% NH₄Cl- 90% Al₂O₃



Gambar 4.15 Ukuran ketebalan coating (a) 6% Al- 2% NH₄Cl- 92% Al₂O₃ (b) 8% Al- 2% NH₄Cl- 90% Al₂O₃



Gambar 4.16 Hasil pengujian EDX dan foto SEM, komposisi : 6% Al- 2% NH_4Cl - 92% Al_2O_3



Gambar 4.17 Hasil pengujian EDX dan foto SEM, komposisi : 8% Al- 2% NH_4Cl - 90% Al_2O_3

Berdasarkan hasil pengamatan SEM, didapatkan foto seperti Gambar 4.14, perbedaan ketebalan disana tampak tidak terlalu besar, hal ini dikarenakan ada bagian *coating* yang terlepas dari bagiannya Gambar 4.14 (b). Terlepasnya bagian *coating* ini disebabkan pengamplasan pada waktu preparasi sampel untuk pengamatan SEM, sehingga bagian yang lepas ini sulit untuk dihitung ketebalannya. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.15 (a) ketebalan lapisan *coating*

yang terbentuk berkisar pada 11,66 μm untuk daerah yang paling tebal dan 9,68 μm untuk daerah yang tipis. Ketebalan lapisan pada komposisi 6 % Al hampir merata diseluruh bagian. Sedangkan pada Gambar 4.15 (b) ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk berkisar pada 12,64 μm untuk daerah yang tebal dan 5,14 μm untuk daerah yang tipis. Ketebalan dari *coating* tersebut seharusnya lebih besar jika *coating* yang sudah terbentuk tidak lepas pada saat preparasi sampel

Hasil yang telah didapat menunjukkan bahwa dengan bertambahnya kandungan aluminium pada material *pack* maka akan meningkatkan ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk. Sehingga akan selalu ada Al *depletion zone* pada material *pack* disekitar substrate setelah proses *aluminizing*. Kehadiran Al *depletion zone* akan menandakan penambahan proses difusi dalam kesetimbangan padat (*solid-state diffusion*), perpindahan fasa uap aluminium halida dari *pack* melalui *depletion zone* ke permukaan substrate adalah salah satu proses yang penting yang mempengaruhi pertumbuhan *coating*. Dapat diasumsikan bahwa reaksi pada permukaan substrate cukup cepat untuk menjaga kesetimbangan pada antarmuka uap halida dan substrate, maka aktifitas Al dipermukaan dan di *pack* harus seimbang. Oleh karena itu semakin banyak kandungan Al maka akan semakin banyak Al yang berdifusi sehingga akan meningkatkan ketebalan *coating* tersebut.

Pada pengujian EDX juga menunjukkan adanya Cr dan oksigen pada lapisan *coating*. Kehadiran Cr pada lapisan *coating* karena difusi yang terjadi kearah luar sehingga tetap ada Cr dan Si dilapisan *coating*, hal ini menunjukkan bahwa aktifitas *pack* rendah (*low activity packs*). Kehadiran oksigen pada lapisan *coating* disebabkan karena terjebakanya partikel Al_2O_3 pada lapisan *coating* karena difusi yang terjadi kearah luar, oleh karena partikel yang terjebak ini maka menyebabkan permukaan *coating* menjadi kasar. Dalam percobaan yang telah dilakukan, permukaan material yang telah *dicoating* cukup kasar. Hal ini memperkuat bahwa *coating* yang terbentuk lebih dominan difusi kearah luar.

BAB 5

KESIMPULAN

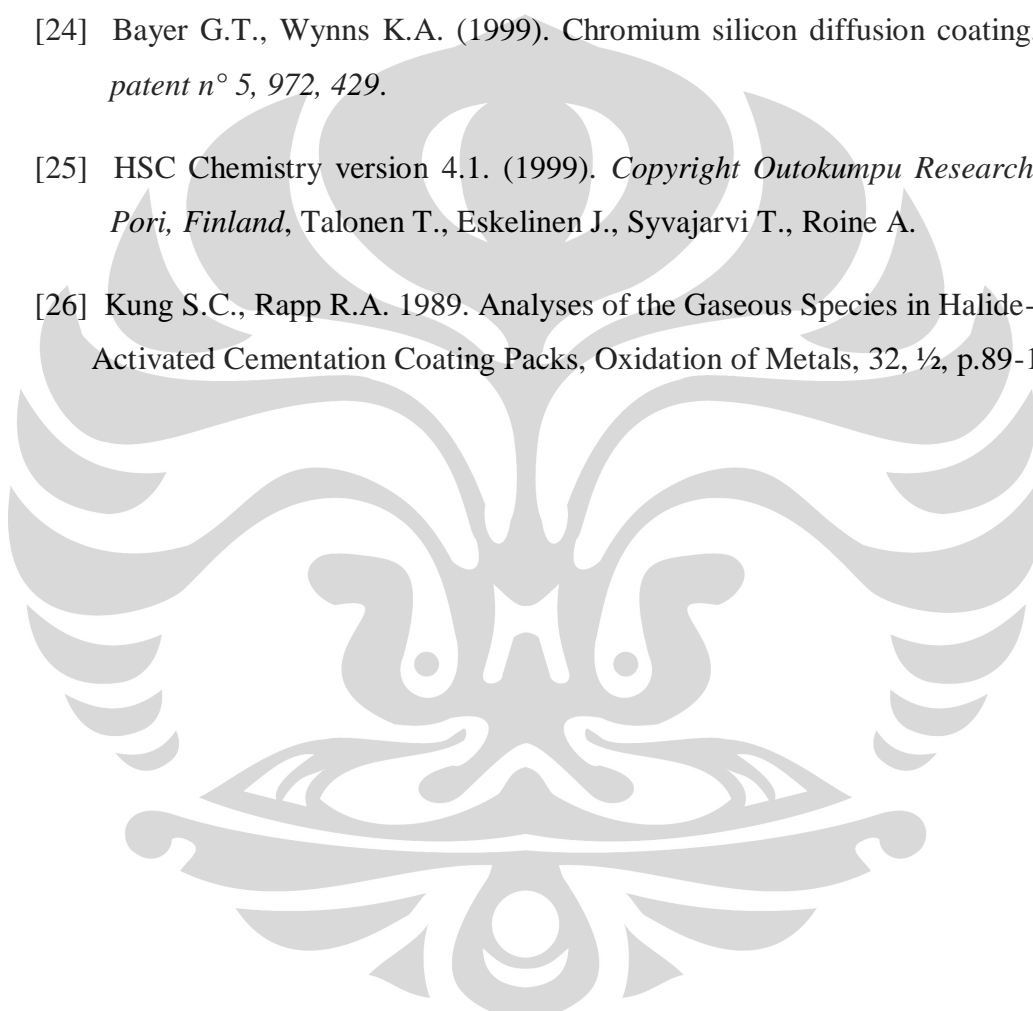
1. Waktu proses akan berpengaruh terhadap ketebalan *coating* yang terbentuk, semakin lama waktu proses maka *coating* yang terbentuk akan semakin tebal. Ketebalan *coating* akan meningkat dari 3,95 μm menjadi 11,66 μm . Waktu proses 3 jam akan menghasilkan *coating* yang terdiri dari larutan padat (*solid solution*) Fe-Al, sedangkan pada waktu proses 6 jam akan menghasilkan *coating* yang terdiri dari lapisan intermetalik Fe-Al.
2. Kandungan alumunium pada material *pack* akan mempengaruhi ketebalan *coating* yang terbentuk, semakin banyak kandungan alumunium maka *coating* yang terbentuk akan semakin tebal. Ketebalan *coating* akan meningkat dari 9,68 μm menjadi 12,64 μm . *Coating* yang terbentuk terdiri dari larutan padat (*solid solution*) Fe-Al. Pembentukan *coating* yang terjadi karena difusi kearah luar (*outward diffusion*)

DAFTAR REFERENSI

- [1] www.bphmigas.go.id/export/sites/default/bphmigaspages/library_regulation/
- [2] www.migasindonesia.com/files/article/Daftar_Pembangkit_Listrik_Di_Indonesia.dc
- [3] www.ccitonline.com/mekanikal/tiki-index.php?page=PLTG
- [4] Bose, Sudhangshu. (2007). *High Temperature Coatings*. Connecticut : Campus of Rensselaer Polytechnic Institute.
- [5] Stroosnijder, M. F., R. Mevrel dan M. J Bennett .(1994). The interaction of surface engineering and high temperature corrosion protection [Review of the book *Materials at High Temperatures*], 12(1), pp. 53-66.
- [6] Meetham, G. W. (1988). Requirement for and factors affecting high temperature capability [Review of the book *Materials and Design*],9(5), pp. 244-252.
- [7] Kittel, C.(1976), *Introduction to Solid State Physics* (5th Ed). John Wiley & Sons.
- [8] Callister, W. D., Jr.,(1995). *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 3rd ed. Wiley, New York.
- [9] Richardson, F.D., and J. H. E. Jeffes (1948). *J. Iron Steel Inst.* Metal Society160, 261.
- [10] Wagner, C.(1959). *Bur. Bunsenges. Phys. Chem.* 63, 772.
- [11] Smialek, J. L., and G. M. Meier.(1987). High temperature oxidation, in *Superalloy II*. pp. 293-323. New York.
- [12] Barret, C. A., R. V. Miner and D. R. Hull.(1983). The effects of Cr, Al, Ti, Mo, W, Ta and Cb on the cyclic oxidation behavior of cast Ni-base superalloy at 1100 and 1150°C, *Oxid. Met.* 20(5/6), 255-278.

- [13] Sarioglu, C., M. J. Stiger, J. R. Blachere, R. Janakiram, E. Schumann, A. Ashary, F. S. Pettit and G. H. Meier. (2000). The adhesion of alumina films in metallic alloys and coatings, *Mater. Corrosion*. 51, 358-372.
- [14] Rohr V. (2005). *Developpment De Revetements Pour Les Aciers D'Echangeurs Thermiques Et Amelioration De Leur Resistance A La Corrosion En Environnement Simulant Les Fumees De Combustion De Charbon*. October 21, 2005. Institut National Polytechnique De Toulouse, Thesis.
- <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000234/01/rohr.pdf>.
- [15] Nicholls, J. R.(2000). Designing oxidation resistant coatings, *JOM*. pp. 52(1), 28-35.
- [16] Nicholls J. R., and P. Hancock.(1987). Advanced high temperature coatings for gas turbines, *Ind. Corros*. pp. 5(4), 8-18.
- [17] Goward, G.W., and L. L. Seigle. (1994). Diffusion coatings for gas turbine engine hot section parts, *ASM Handbook*, Vol. 5, *Surface Engineering*. pp. 3, 475-495.
- [18] Goward, G. W. (1998). Progress in coatings for gas turbine airfoils, *Surface Coating Technology*. 108-109, pp. 73-79.
- [19] Basuki, E., Crosky, A. and Gleeson, D. (2000), International Symposium on High Temperature Corrosion and Protection. Hokkaido, Japan, 315.
- [20] Cockeram B. V., Rapp RA. The kinetics of multilayered Titanium-Silicide Coatings Grown by the pack cementation Method, *Metallurgical and materials transactions A*, 26A p. 777-791.
- [21] Levine, S. R. and Caves, R. M. (1974). *J. Electrochemical Society*, 121, 8. 1051.

- [22] Wachtell R.L. (1974). The basic principles of diffusion coating, *Science and Technology of Surface coating*, B.N. Chapman and J.C. Anderson (eds.), Academic Press London, NY. p. 105-118.
- [23] Leferink R.G.I., Huijbregts W.M.M. (1993). Chromium diffusion coatings for the protection of low alloy steel in a sulphidizing atmosphere, *Corrosion science*, 35, 5-8 p. 1235-1242.
- [24] Bayer G.T., Wynns K.A. (1999). Chromium silicon diffusion coating, *US patent n° 5, 972, 429*.
- [25] HSC Chemistry version 4.1. (1999). *Copyright Outokumpu Research Oy, Pori, Finland*, Talonen T., Eskelinen J., Syvajarvi T., Roine A.
- [26] Kung S.C., Rapp R.A. 1989. Analyses of the Gaseous Species in Halide-Activated Cementation Coating Packs, *Oxidation of Metals*, 32, ½, p.89-109



LAMPIRAN

